易洪波　李智谋　编译

［美］阿尔伯特·爱因斯坦　著

相对论

广义及狭义相对论　全译彩图精解本

一部开启现代科学及哲学思维模式的书

Relativity

重庆出版集团　重庆出版社

影响每一代学人的知识名著



R e l a t i v i t y

文化伟人代表作　图释书系

经典阅读

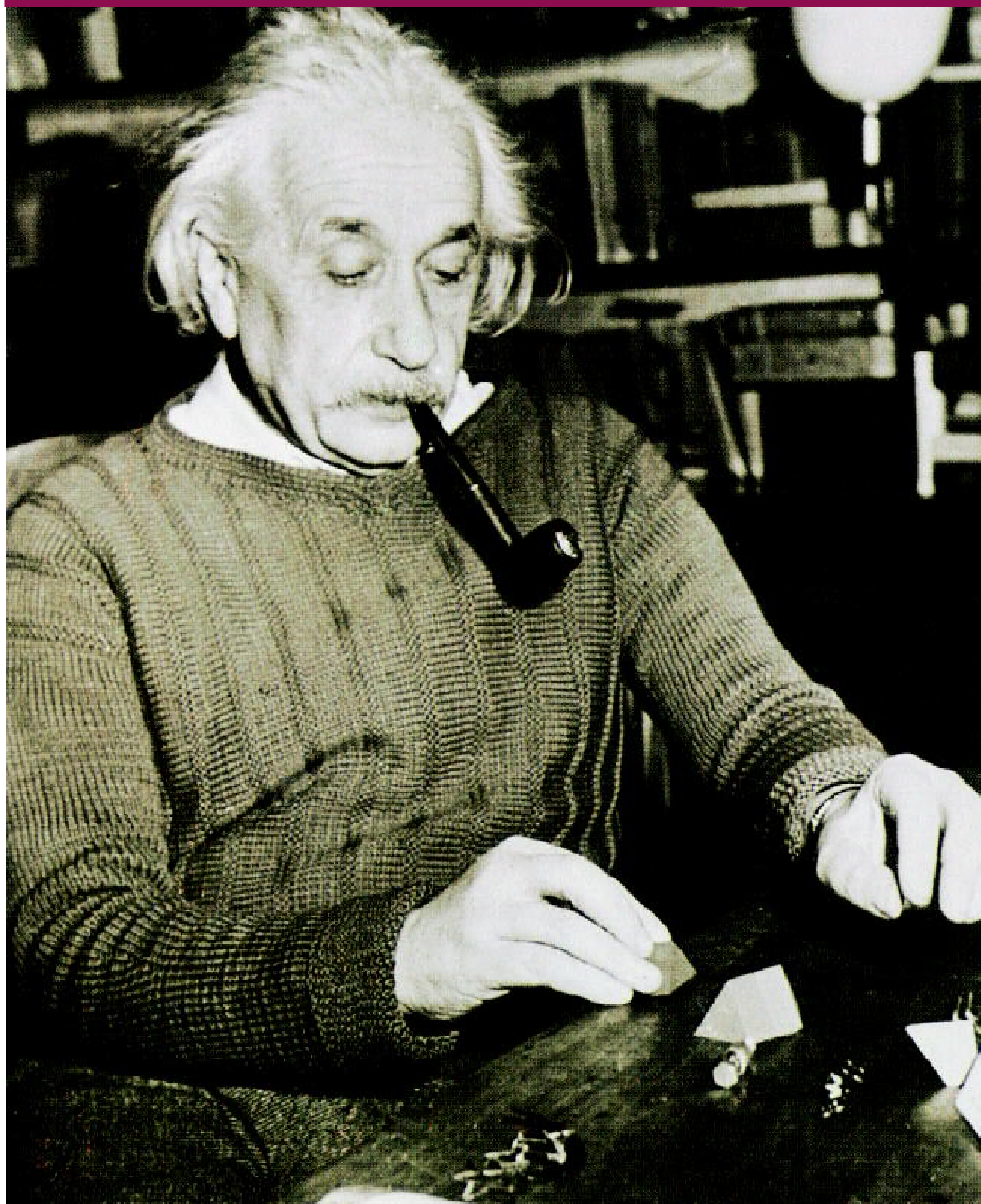
影响每一代学人的知识名著

知识分子阅读，不仅是指其特有的阅读态度和思考方式，更重要的还包括读物的选择。在众多当代出版物中，哪些读物的知识价值最高而且是主流的，许多人都很难确切判定。

“文化伟人代表作　图释书系”，所选择的均为对人类知识体系的构建有着重大影响的伟大人物的代表之作，这些著述一直都极大地丰富着我们的大脑，使人类的思想更为生动、睿智，并被每一代学人视为最理想藏书。

这些著述大都篇幅宏大，难以适应当代阅读的特有习惯。为此，在凝炼编译、准确压缩的基础上，以图释的方式对书中的知识要点进行了精彩补述，既突出了原作者的精要思想，又回避了让更多读者犯难的学究气。

一切尖端的思想都能轻松地理解，一切深奥的知识都可以变成今天的常识。



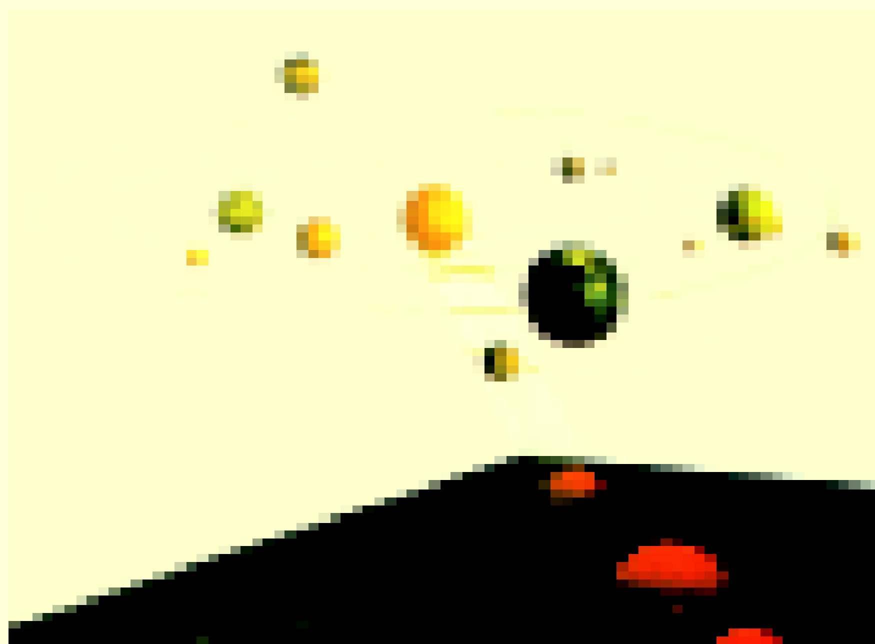
相对论

Relativity

[美]阿尔伯特·爱因斯坦 / 著

一部开启现代科学及哲学思维模式的书

易洪波　李智谋　编译



重庆出版集团　重庆出版社

图书在版编目（CIP）数据

相对论 /（美）爱因斯坦著；易洪波 李智谋 编译.
—重庆：重庆出版社，2006.11
ISBN 7-5366-8121-6

Ⅰ. 相…　Ⅱ. ① 爱… ② 易… ③李 …　Ⅲ. 相对论
Ⅳ. O412.1

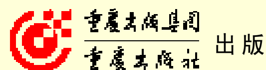
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 117142 号

相对论

XIANGDUILUN

[美] 阿尔伯特•爱因斯坦 著
易洪波 李智谋 编译

出 版 人：罗小卫
策　　划：刘太亨　陈　慧
责任编辑：朱子文　陈红兵
技术设计：日日新文化

 出版

重庆长江二路 205 号　邮编：400016　http://www.cqph.com
重庆龙跃印务有限公司制版
重庆长虹印务有限公司印刷
（重庆市长江一路 69 号　邮编：400014）
重庆出版集团图书发行有限公司发行
E-MAIL: fxchu@cqph.com　邮购电话：023-68809452
全国新华书店经销

开本：787mm × 1092mm　1/16　印张：21.5　字数：404 千
2006 年 11 月第 1 版　2006 年 11 月第 1 次印刷
印数：1-10000
定价：58.00元

如有印装质量问题，请向本集团图书发行有限公司调换：023-68809955 转 8005

编译者语

我们全都因他受益，
他的教诲惠及全球，
那本属于私有之物，
早已传遍人间，
他正如天际的明星，
无尽的光芒与他永伴。

——歌　德

在世界上所有的科学杂志中，最受收藏家欢迎的单本杂志是1905年第17卷《物理学年鉴》，因为这上边发表了爱因斯坦的三篇论文：对M.普朗克量子理论进行首次实验性证实的《关于光的产生和转化的一个启发性观点》、考察布朗运动的《关于热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动》，以及提出时空新理论的《论动体的电动力学》。前者因为“光电效应定律的发现”而获得1921年诺贝尔物理学奖；后者建立了狭义相对论，并由此推导出了那个著名的质能方程：$E=mc^2$。

爱因斯坦（1879~1955年），现代物理学的开创者和奠基人。生于德国乌尔姆。1900年毕业于瑞士苏黎世联邦工业大学并入瑞士籍。1905年获苏黎世大学博士学位。曾在瑞士联邦专利局工作。1909年任苏黎世大学理论物理学副教授，1911年任布拉格大学教授。1913年任德国威廉皇家物理研究所所长、柏林大学教授，并当选为普鲁士科学院院士。1932年受希特勒迫害离开德国，1933年10月定居美国，到普林斯顿大学任教，直到去世。

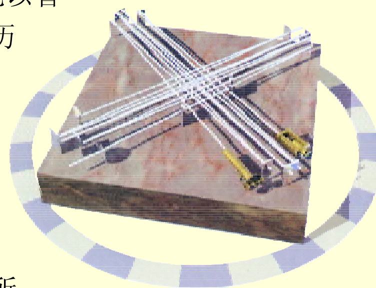
爱因斯坦把伽利略力学运动的相对性原理扩展开来，使之包括所有物理定律，又把观测和实验得来的光速不变也提升为公理。如果两者同时成立，不同

的惯性系的各个坐标之间必然存在一种确定的数学关系，这就是洛伦兹变换。通过这种变换，他推导出，运动的尺子要缩短，运动的钟要变慢，任何物体的运动速度都不能超过光速。自然现象在运动学方面显示出统一性。这就是“狭义相对论”。

1916年，爱因斯坦发表了《广义相对论的基础》，这标志着广义相对论的诞生。爱因斯坦发现，现实的有物质存在的空间，不是平坦的欧几里得空间，而是弯曲的黎曼空间；空间的弯曲程度取决于物质的质量及其分布状况，空间曲率就体现为引力场的强度。这就否定了牛顿的绝对时空观。广义相对论实质上是一种引力理论，它把几何学与物理学统一起来，用空间结构的几何性质来表述引力场。爱因斯坦提供了三个可供实验验证的推论：第一是水星近日点的进动，这在当时就得到完满解决。第二，在强引力场中，时钟要走得慢些，因此从巨大质量的星体表面射到地球上的光的谱线，必定显得要向光谱的红端移动。这在1925年得到观测验证。第三，光线在引力场中的偏转。这在第一次世界大战结束后的对日全食的观测中得到了验证。正因为如此，广义相对论顷刻间闻名于世。

“对不起，牛顿。” 爱因斯坦幽默地说。1687年，牛顿出版了《自然哲学的数学原理》，推翻了神学千年的根基，建立了完整而严密的经典力学体系。两个多世纪以后，爱因斯坦建立了相对论，颠覆了牛顿的经典力学，开辟了现代理论力学的新纪元。

爱因斯坦是千年以来最伟大的科学家。他以智慧之手，探询着上帝跳动的脉搏。相对论也是历史上最伟大的思想之一。爱因斯坦曾说，世界上可能只有12个人能够看懂相对论，但是世界上却有几十亿人借此明白没有什么是绝对的。爱因斯坦一生都不赞成将相对论应用于物理学之外，但他生前以及身后，相对论却在不断被引向文学、艺术、哲学、宗教等几乎所有学科。






热爱和平的爱因斯坦

相对论：当你陪一个美丽的姑娘坐上两小时，你会觉得好像只坐了一分钟；当你坐在炙热的火炉旁，哪怕只坐上一分钟，你会感觉好像是坐了两小时。这，就是相对论。

成功公式：W=X+Y+Z。W 代表成功，X 表示艰苦的努力，Y 代表正确的方法，Z 表示少说空话。

质能公式：$E=mc^2$。E 代表物体静止时所含的能量，m 代表它的质量，c 代表速度。这意味着每一单位都有一巨大的能量。而当质量为 m 的原子分为 m' 和 m'' 时，释放出的能量将至巨大。这就是原子弹的理论依据。

我们必须承认，我们对自然规律的认识非常不完备和非常零碎。因此相信自然界有一种包罗万象的根本规律，这种看法本身也是建立在某种信念之上。科学研究所取得的进展，已经在很大程度上证明了这种信念是站得住脚的。



相对论简史（代序）

[英] 史蒂芬·霍金

谁是20世纪最伟大的人？美国《时代》周刊通过数百位当世名人的遴选，爱因斯坦、富兰克林·罗斯福及甘地得票最高。而由英国物理学家史蒂芬·霍金撰文介绍的爱因斯坦，成为无可争议的20世纪最伟大的人。



19世纪后期，科学家相信，他们对宇宙的完整描述就要接近尾声。在他们的想象中，一种叫“以太”的连续介质充满了宇宙空间，空气中的声波、光波和电磁信号，就是“以太”中的波。

然而，不久以后，与空间完全充满“以太”的思想相悖逆的理论出现了：根据“以太”理论可知，光线传播速度相对于“以太”应是一个定值。因此，如果你沿着与光线传播相同的方向行进，你所测得的光速应比你在静止时测得的光速低；反之，如果你沿着与光线传播相反的方向行进，你所测得的光速应比你在静止时测得的光速高。但是，造成光速差别的证据在实验中没有找到。

在这些实验当中，1887年，在美国俄亥俄州克里夫兰的凯斯研究所，阿尔伯特·迈克尔逊和埃迪沃德·莫里完成了最准确细致的测量。他们测量了两束成直角的光线的传播速度。根据推理，由于自转和绕太阳的公转，地球应在“以太”中穿行，因此，上述两束光线应因地球的运动而测得不同的速度。莫里发现，无论是昼夜或冬夏，都未引起两束光线速度的



史蒂芬·霍金　摄影　20世纪

史蒂芬·霍金是英国物理学家，他用毕生精力研究黑洞普通物理学定理不再适用的时空领域和宇宙起源大爆炸原理。他提出黑洞能发射辐射（现在叫霍金辐射）的预言现在已是一个公认的假说。他的研究工作在科学界远不及他的畅销书《时间简史》出名。他这本销售量达2 500万册的畅销书对量子物理学和相对论作了大量介绍。

变化。不论你运动与否，光线似乎总是以相同的速度传播。

爱尔兰乔治·费兹哥立德和荷兰亨卓克·洛伦兹最早认为，相对于“以太”做运动的物体在运动方向上的尺寸会收缩，而时钟会变慢。但是，他们同时认为，“以太”是一种真实存在的物质。

这时候，是瑞士首都伯尔尼的瑞士专利局年轻的阿尔伯特·爱因斯坦，插手“以太”说，并一次性永远地解决了光传播速度的问题。

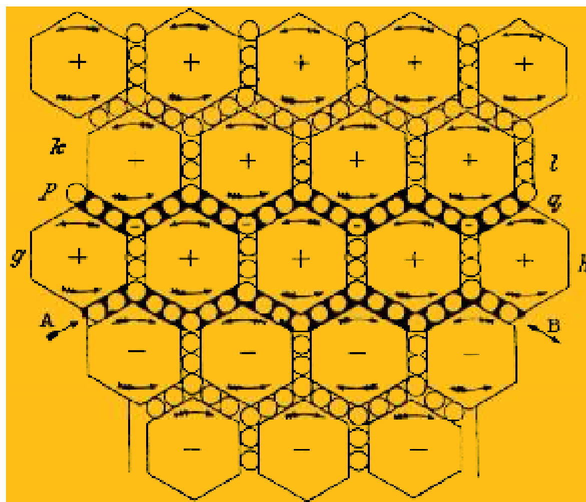
1905年，爱因斯坦的论文指出，由于人们无法探测出自己是否相对于“以太”的运动，因此，关于“以太”的整个概念纯属多余。爱因斯坦认为，科学定律应该赋予所有自由运动的观察者相同的形式，无论观察者如何运动，他们都应该测量到同样的光速。

这个思想中，爱因斯坦要求人们放弃所有时钟测量到的那个普适的时间概念，结果每个人都有他自己的时间值：如果两个人是相对静止的，他们的时间就是一致的；如果他们间存在相互的运动，他们观察到的时间就会不同。

大量的实验证明，爱因斯坦的这个思想是正确的。一个绕地球旋转的精确的时钟与存放在实验室中的精确时钟相比，前者确有时间指示上的差别。如果你想延长你的生命，你可以乘飞机向东飞行，这时，叠加上地球旋转的速度，你就可以获得那零点几秒的生命延长，也可以以此弥补你因食用航空食品带来的损害。

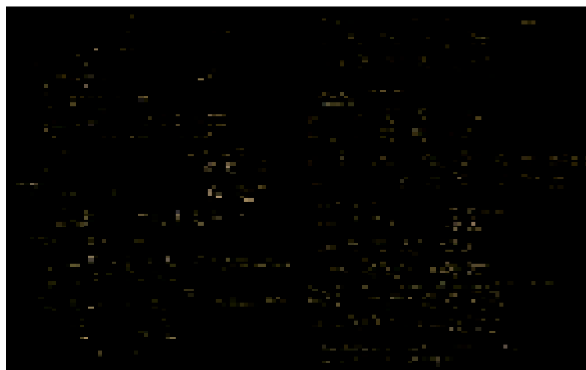
以太合成图

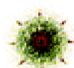
如果以太存在且静止不动，那么地球上测量到的光速就会因为地球运动的方向而有快慢之别。此图是麦克斯韦以太理论的图解。



爱因斯坦手稿　摄影

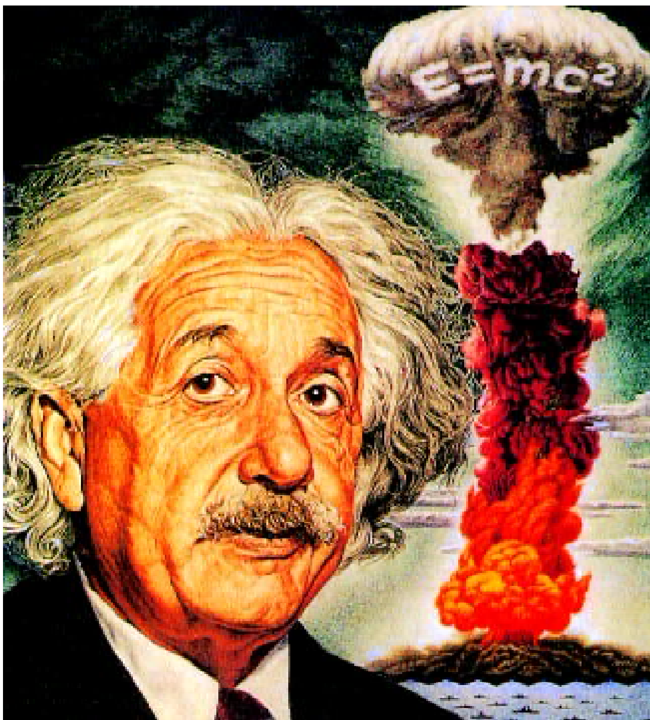
1912年在苏黎世，爱因斯坦灵感如潮。他意识到如果能在几何中引入一些调整，重力与加速的等价关系就可以成立。1913年在格罗斯曼的协助下，他发表了一篇文章，其中提到：我们所认识到的重力，只是时空弯曲的事实的一种表述。在这个手稿中，爱因斯坦就论述了这些理论。







爱因斯坦认为，对所有自由运动的观察者而言，自然定律都是相同的，这个前提是相对论的基础。因为，这个前提隐含了只有相对运动是重要的。虽然相对论的完美与简洁折服了许多科学家和哲学家，但是相反意见仍然很多。爱因斯坦摒弃了19世纪自然科学的两个绝对化观念：“以太”所隐含的绝对静止和所有时钟所测得的绝对或普适时间。



爱因斯坦与质能方程　合成图片

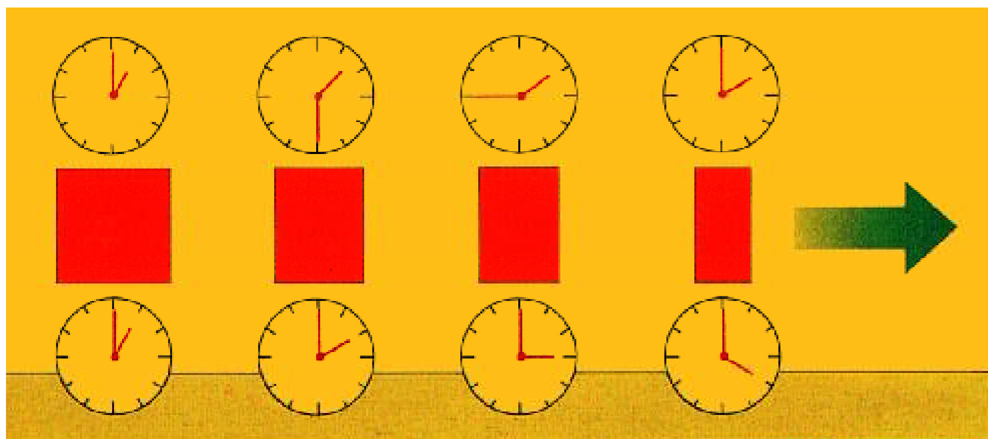
在爱因斯坦理论的物理理论中，有一个质量能量方程：$E=mc^2$。在这个质量能量方程刚开始建立的时候，很多人不相信这个理论，后来在原子弹爆炸的时候，有人彻底相信这个理论了。相信任何物质在通常情况下都包含有很大的能量，只是没有找到向外释放能量的途径。于是很多人通过努力想找到反物质，用来找到普通物质释放能量的途径，用来造福于人类。

人们也许会问，相对论是否隐含了这样的意思：任何事物都是相对的而不再会有概念上绝对的标准？

这种疑问从20世纪20年代一直持续到30年代。1921年，由于对光电效应的贡献，爱因斯坦获得了诺贝尔物理奖，但由于相对论的复杂及有争议，诺贝尔奖的颁奖辞只字未提相对论。

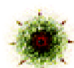
迄今为止，我仍然每周收到2~3封信，信中说爱因斯坦错了。但是，现在相对论已经被科学界完全接受，无数实验也证实了相对论的预言。

相对论的重要结论之一，是质量与能量的关系。对所有的观察者而言，爱因斯坦的假定光速是相同的，没有可以超过光速运行的事物。如果给粒子或宇宙飞船不断地供应能量，会发生什么现象呢？被加速物体的质量就会增大，使得更快的加速很难进行。把一个粒子加快到光速是不可能的，因为那需要无穷大的能量。质量与能量是等价的，它们的关系被爱因斯坦总结在著名的质能方程“$E=mc^2$”中，这或许是迄今为止家喻户晓的唯一一个物理方程。



广义相对论　合成图片

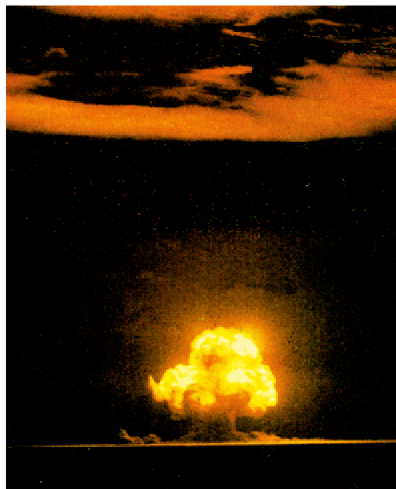
广义相对论包括等效原理、广义协变性原理和马赫原理。其中，等效原理是广义相对论最重要的基本原理，这个原理的实验依据是引力质量和惯性质量的等价性。爱因斯坦采用弯曲时空的黎曼几何来描述引力场，给出引力场中的物理规律，进而提出引力场方程，奠定了广义相对论的基础。



铀原子核裂变为两个小的原子核时，很小的一点质量亏损会释放出巨大的能量。这就是质能方程众多推论之一。1939年，第二次世界大战阴云密布，一组意识到裂变反应应用的科学家游说爱因斯坦，让他战胜自己是和平主义者的顾忌，去给时任美国总统富兰克林·德拉诺·罗斯福写信，劝说美国开始核研究计划。于是就有了“曼哈顿工程”和1945年在广岛上原子弹的爆炸。有人因为原子弹而责备爱因斯坦对质能关系的发现，但是这就好像因为飞机遇难而责备牛顿发现了万有引力一样。相反，爱因斯坦并未参与“曼哈顿工程”的任何过程，并惊惧于那巨大的爆炸。

原子弹爆炸　摄影

爱因斯坦关于能量与质量关系的理论——$E=mc^2$，它统一了以前的能量守恒定律与质量守恒定律，揭示了核能的存在。在爱因斯坦这个理论的基础上，美国率先制造出了世界上第一颗原子弹。



相对论完美地结合了电磁理论的有关定律，但它与牛顿的重力定律并不相容。牛顿的重力理论表明，如果你改变空间的物质分布，整个宇宙的重力场将同时发生改变，这意味着你可以发送比光速更快的信号，同时需要绝对或普适的时间概念。这为相对论所不相容。

早在1907年，爱因斯坦就想到了这个不相容的困难，那时他还在波恩的专利局工作。但直到1911年，在德国的布拉格工作时，爱因斯坦才深入思考这个问题。他意识到加速与重力场的密切关系：在密封

厢中的人，无法辨别他自己对地板的压力的来源——是由于地球的重力场中的引力，还是由于在无引力空间中加速的结果（这些都发生在“星际旅行”的时代之前，爱因斯坦把人设想在电梯中而不是宇宙飞船中）。

但我们知道，如果不想让电梯碰撞的事情发生，你不能在电梯中加速或自由坠落许久；如果地球是完全平整的，人们可以说苹果因重力落在牛顿头上与因牛顿与地球表面加速上升而造成了牛顿的头撞在苹果上是等价的。

但是，这种加速与重力的等价在地球是圆形的前提下不再成立，因为在地球相反一面的人将会被反向加速，但两面观察者之间的距离却是不变的。

1912 年回到瑞士苏黎士时，爱因斯坦来了灵感。他想，如果真实几何中引入一些调整，重力与加速的等价关系就可以成立。如果三维空间加上第四维的时间所形成的空间－时间实体是弯曲的，那是怎样的结果呢？他认为，质量和能量将会造成时空弯曲，这在某些方面已经被证明，比如行星和苹果。物体趋向于直线运动，但是，它们的运动轨迹会被重力场弯曲，因为重力场弯曲了时空。

在马歇尔·格罗斯曼的帮助下，爱因斯坦潜心学习弯曲空间及表面的理论，这些抽象的理论被玻恩哈德·瑞曼发展起来时，从未想到与真实世界会有联系。



漂浮　玛格列特　油画

尽管今日我们对太空人漂浮太空中的景象已不再陌生，玛格列特的这幅画仍然具有特殊的意思。这些下降中的戴帽先生自以为是静止不动的，这点让人觉得有点诡异。其实，玛格列特很成功地画出了物理的基本概念：不论运动形态如何，观察者的观点都是等价的。

世界图　合成图片

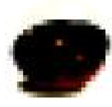
这幅图描绘了物理学中一些试图解释宇宙的理论模型。这些理论都在试图采用某种“世界图”来解释宇宙。如同一个无限的乌龟塔来支撑着平坦的地球是这样的一种图像一样，超弦理论也是一种图像，虽然后者比前者更数学化更准确，但它们都是关于宇宙的理论。

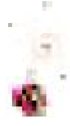

龟宇宙


德谟克里特原子

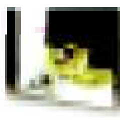

平坦地球模型

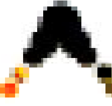

托勒密体系


哥白尼体系

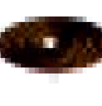

卢瑟福原子


尼尔斯·玻尔原子

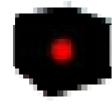

强人择模型


弗利德曼闭合宇宙

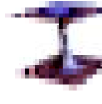

膨胀气球理论


黑洞理论


无边界设想


历史求和模型


弦理论


虫洞模型


暴胀宇宙



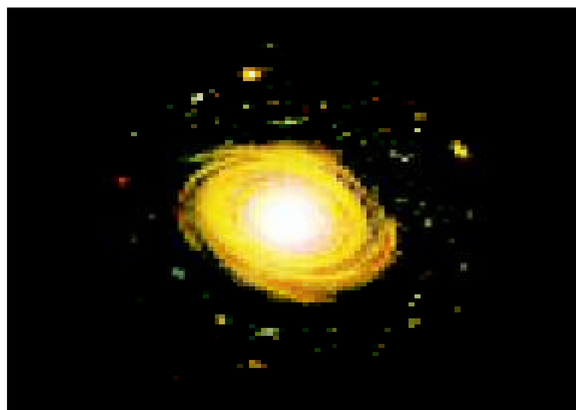
1913 年，爱因斯坦与格罗斯曼合作发表文章，他们提出了一个思想：我们所认识的重力，只是时空弯曲的事实的一种表述。但是，由于爱因斯坦的一个失误，他们当时未能找出时空弯曲的曲率以及能量质量的关系方程。

在柏林，爱因斯坦避开家庭的烦扰和战争的影响，继续研究这个问题。1915 年 11 月，他最终发现了联系时空弯曲与蕴涵其中的质能关系的方程式。1915 年夏天访问哥廷根大学期间，爱因斯坦曾与数学家戴维·希尔波特讨论过他的这个思想，希尔波特早于爱因斯坦几天也找到了同样的方程式。尽管如此，希尔波特承认，这种新理论的荣誉应属于爱因斯坦，因为正是爱因斯坦将重力与弯曲时空联系起来。这还应感谢文明的德国，因为在那里，即使在当时的战争期间，这样的科学讨论及交流仍然能够得以不受影响地进行，与 20 年后所发生的事情（指第二次世界大战）形成多么巨大的对比！

关于弯曲时空的新理论叫做“广义相对论”，以与原先不包含重力的理论相区别，那个理论被改称为“狭义相对论”。1919 年，人们以颇为壮观的形式证明了“广义相对论”：一支英国科学考察队远征到西非，在日食期间观察到天空中太阳附近一颗恒星位置的微小移动。这证实了爱因斯坦的论断，恒星发出的光线在经过太阳附近时，由于引力而弯曲了。这个证明时空弯曲的直接论据，在公元前 300 年欧几里得《几何学原本》之后，是

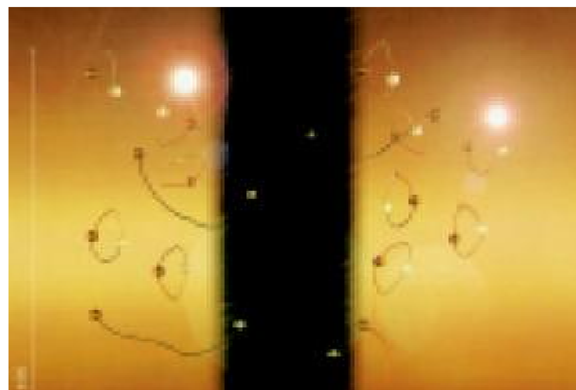
宇宙的终结　合成图片

关于宇宙的终结，目前有四种学说：第一种，宇宙内的所有恒星，消耗完自身的能量后，变成无数个黑洞，最终变成一个大黑洞，宇宙变成一个混沌世界；第二种，宇宙不断膨胀；第三种，宇宙收缩，最终又变为一个奇点，反复爆炸，膨胀，收缩；第四种，宇宙在爆炸收缩中不断反复，既不会变为奇点也不会死亡。



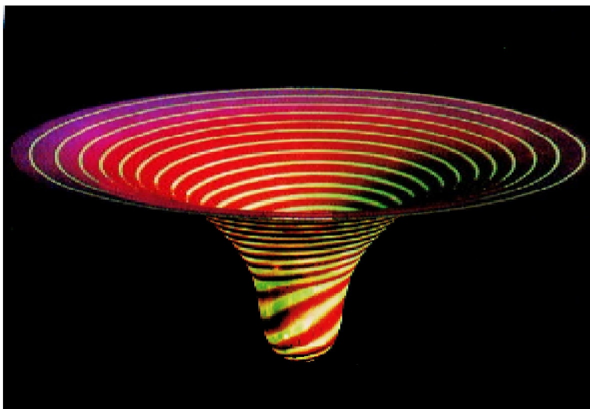
黑洞　合成图片

在黑洞的视界邻近，虚粒子出现并相互湮灭。粒子对中的一员落入黑洞，而它的伴侣自由逃逸。从视界外面看，黑洞正把逃逸的粒子发射出来。在空虚的空间中，粒子对出现，引起简短的存在，然后再相互湮灭。



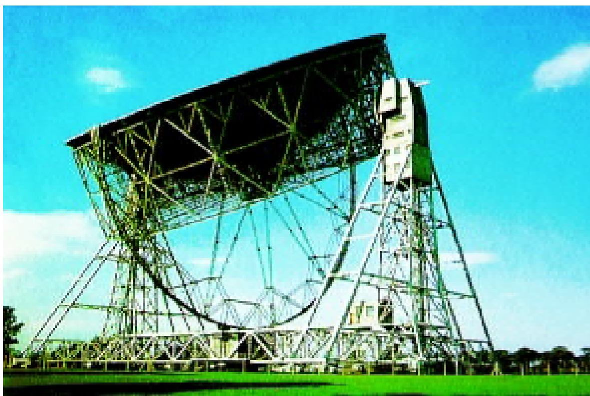
人类感知他们存在于宇宙的一个最大的革命性更新。

将“时空”由被动的时间发生背景转变为动态宇宙的主动参与者，“广义相对论”导致了居于科学前沿的一个巨大困难，到20世纪结束之际仍未解决。物质充满着宇宙，同时又导致了时空弯曲而使得物体相互聚集。用“广义相对论”解释静态的宇宙时，爱因斯坦发现，他的方程式是无解的。为适应静态宇宙，爱因斯坦变通了他的方程式，在其中加入了一个名为“宇宙常量”的项。这个“宇宙常量”将再次弯曲时空，以使所有的物体分开，“宇宙常量”引入的排斥效果将平衡物体的相互吸引作用，而保持宇宙的长久平衡。



热大爆炸模型　合成图片

在热大爆炸模型中，膨胀率总是随时间减小的，但是由于早期的宇宙可能存在一个非常快速膨胀的时期，这种膨胀叫“暴胀”。而在暴胀模型中，膨胀率在早期阶段是快速增大的。



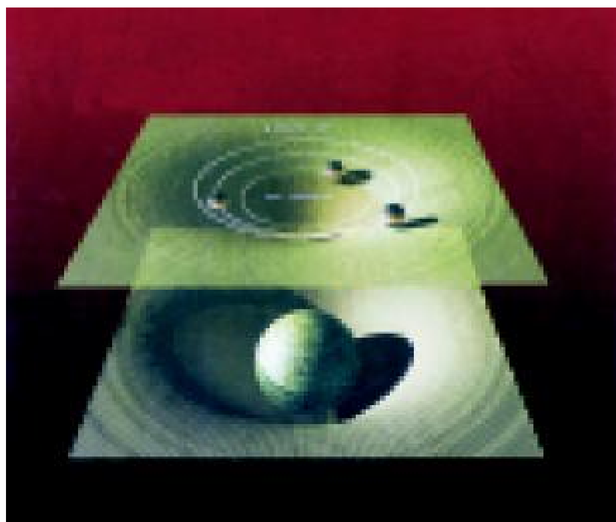
射电望远镜　摄影

这是英国约德雷尔·邦克的射电望远镜。如此巨大的望远镜比光学搜索更容易认证作为正在发出强烈无线电波的源的脉冲星。

事实上，这是人类在理论物理历史上丧失的最大机遇之一。如果爱因斯坦继续在这一方向上不断研究，而不是变通地引入“宇宙常量”，他可能对宇宙是在扩张还是在收缩做出预言。然而，直到20年代，当威尔逊山上的100英寸的天文望远镜观察到遥远的星系在以越来越快的速度远离我们时，宇宙依然正在随着时间的推移而稳定地膨胀。爱因斯坦后来才认识到，“宇宙常量”的提出是他一生中最严重的错误。

人们对于宇宙的起源及归宿的讨论方向，被“广义相对论”彻底改变。静止的宇宙可能会永远存在，或者说，在过去的某个时间，这一静止的宇宙产生之时，也就已经是现在的形态了。从另一方面来说，如果现在的星系正在彼此远离，那么，在过去的时间里，它们彼此之间应该是十分临近的——在大约150亿年前，它们甚至可能彼此靠近，相互重



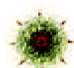


膜世界场景　合成图片

在膜世界场景中，由于引力传播入额外的维，行星可以围绕在影子膜上的暗质量公转。

叠，密度可能也是无穷大。“广义相对论”告诉我们，宇宙大爆炸标志着宇宙的起源、时间的开始。因此，爱因斯坦不仅是过去100年中最伟大的人物，他应该获得人们更加长久的尊敬。

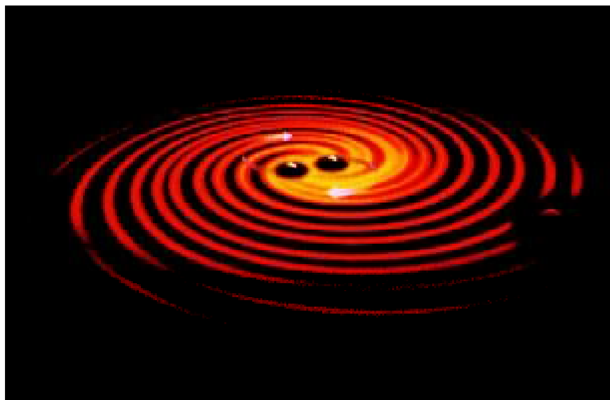
在黑洞中，空间与时间是如此地弯曲，以至于黑洞吸收了所有的光线，没有一丝光线可以逃逸。因此，“广义相对论”预言时间应终止于黑洞。但是，广义相对论方程并不适用于时间的开端与终结这两种极端情形。因此，这一理论并不能揭示大爆炸的结果，一些人认为这是上帝万能的一种象征，上帝可以用自己的方式来开创宇宙。



可是，另一些人（包括我自己）认为，宇宙的起源应该服从于一种普适原理——它在任何时候都是成立的。在朝这一方向的努力过程中，我们取得了一些进展，但距完全理解宇宙的起源还相去甚远。广义相对论不能适用于大爆炸的原因是，它与20世纪初另一伟大的概念性的突破——量子理论并不相容。量子理论的最早提出是在1900年。当时柏林的麦克斯·普朗克发现，从红热物体上发出的辐射，可以解释为“光线以有特定大小的能量单元发出”，普朗克把这种能量单元称为量子。辐射好比超级市场里的袋装白糖，并非你想要多少的量都行，相反，你只能买每袋一磅的包装。1905年，爱因斯坦在一篇论文中提到普朗克的量子假设可以解释光电效应。他也因此获得

引力波　合成图片

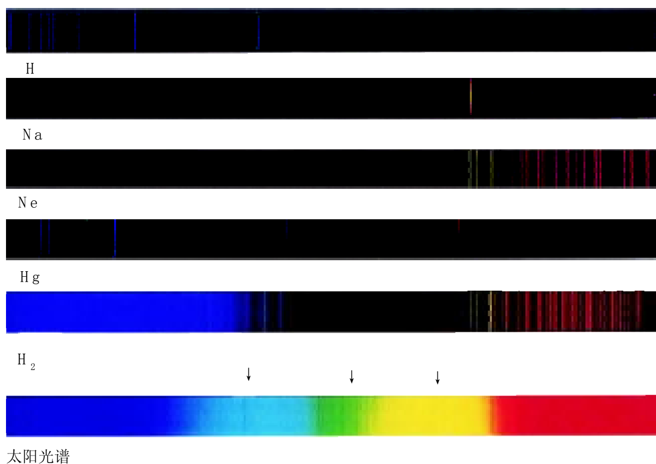
引力波是广义相对论引力方程的波动解所预言的引力场波动形式。图中，在PSR1913+16区域的两个中子星因发射引力波而失去能量，因此它们以螺旋形轨道相互靠近。



了1921年的诺贝尔物理学奖。

爱因斯坦对量子的研究延续至20年代。当时哥本哈根的华纳·海森堡、剑桥的保尔·狄拉克以及苏黎士的埃文·薛定谔提出了量子机制，从而展开了描述现实的新画卷。他们认为，小粒子不再具有确定的位置和速度，相反，小粒子的位置测得越精确，它的速度测量就愈不准确；反之亦然。面对这种基本定律中的任意性和不可预知性，爱因斯坦十分惶惑。他最终没有接受量子机制。他的著名的格言“上帝并不是在投骰子”就是表达的这一感受。虽然如此，全新的量子机制定律为大多数的科学家所接受，并承认了其实用性，因为这些定律不但吻合实验结果，而且可以解释许多以前不能解释的现象。这些定律成了当代化学、分子生物学以及电子学发展的基础，也是在过去半个世纪内铸造整个世界的科技基石。





原子光谱　合成图片

原子内部电子运动状态发生变化而产生的发射光谱或吸收光谱，由许多分立的谱线组成，每种原子都有自己的特殊光谱，它按一定规律形成若干组光谱线系。原子光谱线系的性质主要决定于原子核外电子层结构，是研究原子结构的重要依据。

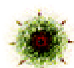
1933年，纳粹统治了德国，爱因斯坦放弃了德国国籍，离开了这个国家。在美国新泽西州普林斯顿的尖端科学研究所，爱因斯坦度过了他生命中最后的22年时光。当时，纳粹发动了一场反对“犹太科学”以及犹太科学家的运动（大批科学家被驱逐出境，也是德国未能造出原子弹的原因之一）。这场运动的主要目标是爱因斯坦和他的相对论。得知一本名为《反对爱因斯坦的100位科学家》的书出版时，爱因斯坦回答，为什么要100位？一位就足够了，如果我真的错了的话。

二战后，爱因斯坦敦促盟军设立一个全球机构以控制核武器。1952年，爱因斯坦被刚成立的以色列政府授予总统职务，但他拒绝了。“政治是暂时的，”他说，“而方程是永恒的。”广义相对论方程是他最好的纪念碑和墓志铭。它们与宇宙一起永不腐朽。

爱因斯坦讲述《相对论》

——编者导读

我已经67岁了，今天坐在这里，为的是要写点类似自己的讣告那样的东西。我做这件事，不仅因为希耳普博士说服了我，而且我自己也确信，向那些与我一起奋斗的朋友回顾我们奋斗和探索的历程，应该是一件好事。稍作考虑之后，我觉得，这种尝试的结果不会完美无缺。因为，一个人的工作生涯不论怎样短暂和有限，其间走过的弯路如何之多，要把那些值得讲的东西讲清楚，仍然是不容易的——现在这个67岁的人已完全不同于他50岁、30岁或者20岁的时候了。任何回忆都会染上了当前的色彩，同时也会受到不可靠的观点的影响。这很容易使人气馁。然而，一个人还是可以从自己的经验里提取许多别人所意识不到的东西。



当我还是一个相当早熟的少年的时候，我就深切地领会到，那些驱使大部分人一辈子不停地追逐的愿望和奋斗，都是毫无价值的。而且，我不久就发现，与现在相比，当年的这种追逐的残酷被更加精心地掩饰在伪善和漂亮的字句之下。只因为有个胃，每个人就注定要参与这种追逐。而且，由于参与这种追逐，胃有可能得到满足。但是人不会，因为他还有思想、有感情存在。摆脱这种困境的第一条路就是宗教，它通过传统的教育机关

爱因斯坦解释公式　资料图　1934年

1934年，爱因斯坦与400名美国科学家进行了改造模型的讨论。在卡耐基技术研究院小剧场的讲台上，爱因斯坦向他们讲述能量聚集的理论。图为演讲后他正在向人们解释他的公式。思想系统的存在与交流与物质世界的静止与运动一样真实，关于真理知识的交流永远推动着人与真实的接近。





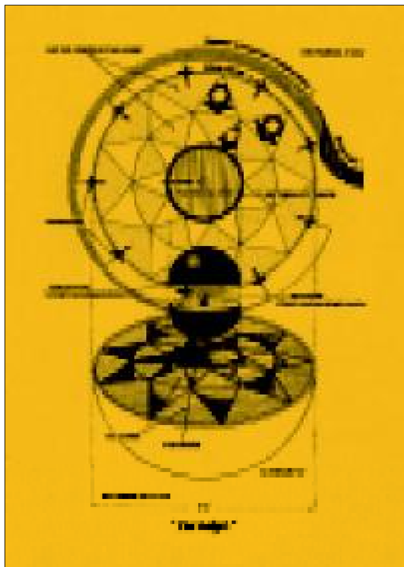
光与透镜　摄影

物理学研究许多日常生活用品的用途及功能：光通过玻璃时的行进方向，决定了我们用放大镜、相机镜头或望远镜看物体时产生的效果。这些物理知识在社会生活中的运用促进了我们更准确地认知世界。

灌输给每一个儿童。因此，尽管我的双亲完全没有宗教信仰，我还是深深地信仰宗教。但是，12 岁那年，我的这种信仰突然终止了。由于读了科普书籍，我很快就相信，《圣经》里有很多故事不可能是真实的。其结果是，在一场近乎疯狂的自由思考后我发现：国家总是故意用谎言来欺骗年青人。这种印象令人目瞪口呆。这次经历让我对所有权威产生了怀疑，对任何社会情境里都会起作用的信念都会持怀疑态度。我始终坚持着这种态度，虽然在后来由于对因果关系的更好洞察使它失去了原有的尖锐性。

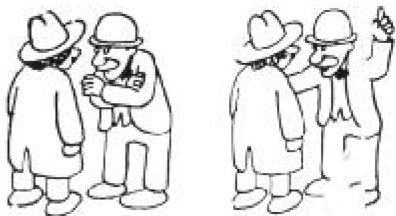
很显然，少年时代的宗教天堂的失去是我的第一个尝试。它让自己从纯粹个体的锁链中，从由愿望、期待和原始感情所统治的存在中解放出来。在我们之外，有一个独立于我们人类而存在的巨大的世界，对于人类而言，它就像一个伟大的永恒之谜，我们通过观察和思考只能部分地抵达它。对这个世界的沉思，就像是对自由的召唤，而且我很快注意到，许多我所尊敬和仰慕的人，都在这种追求中，找到了内心的自由和安宁。在我们力所能及的范围里，用思维去把握这个外在于人的世界，总是有意无意地成了我心中的最高目标。过去和现在受到过同样激励的人们，以及他们已经获得的真知灼见，都是我的不可失去的朋友。通往这个天堂的道路，并不像通向宗教天堂的道路那样舒适和迷人，但是，事实证明它是可以信赖的，我也从未后悔自己选择了它。

我所讲的这些，仅仅在一定意义上是正确的，正像一张寥寥几笔勾画的图画，只能在相当有限的意义上忠实于一个细节混乱的复杂对象一样。如果一个



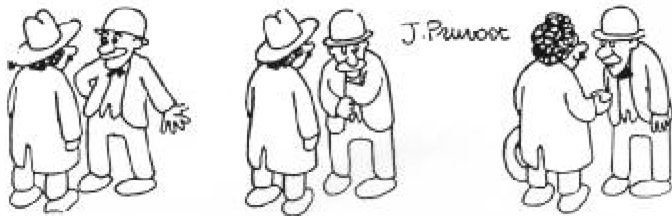
原子弹图解合成图片

在爱因斯坦相对论理论的指导下，科学家开始深入地研究原子领域，并期望利用原子的力量来为人类服务。原子弹计划的出现就是其直接的产物。此图为原子弹的分解图：一个棒球大小的胚球将产生毁灭性的能量。

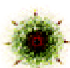


相对论的传播　漫画

爱因斯坦的相对论原理面世之后，就引起了物理学界的轰动，也成为人们闲暇时的话资。这幅漫画就生动地描绘了人们在谈论相对论的情形。



人喜欢有条理的思想，那么，他的天性的这一方面很可能会以牺牲其他方面为代价而发展得更为突出，并且愈来愈明显地决定着他的精神面貌。在这种情况下，这样的人在回忆中所看到的，很可能只是一致的、系统的发展，然而，他的实际经验却产生于千变万化的具体处境中。外部情境的多变性，以及瞬间意识内容的有限性，使得每一个人的生活有了一种模糊性。像我这种类型的人，其成长的转折点在于，自己的主要兴趣逐渐从转瞬即逝的、纯粹个人的层面解放出来，而转向努力从思想上去把握事物。这是一次意义深远的转折。从这个角度来看，上面以这样简要文字表达的概论里，已包含着尽可能多的真理了。

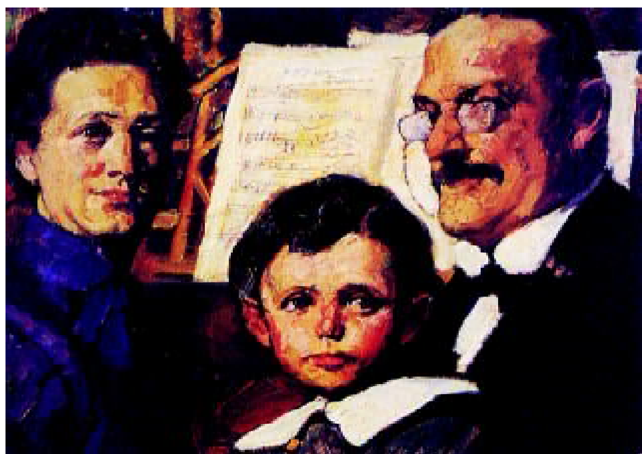


思维和惊奇

准确地说，“思维”是什么？当我们接受感觉印象、产生记忆图像时，这还不是“思维”。而且，当这些图像形成系列，每一个形象都产生另一个形象时，这也不是“思维”。可是，当某一形象在许多这样的系列中反复出现，它就形成了这种系列的组织性要素，因为它把那些本身没有联系的系列联结了起来。这种要素便成了一种工具、一种概念。我认为，从自由联想或者“梦想”向思维

爱因斯坦与父母　摄影

幼年时期的爱因斯坦给人的印象并不聪慧，甚至有些平庸。他举止迟缓而又害羞，连说话也是支支吾吾。图为幼年时期爱因斯坦与父母在一起的情景。



过渡的标志，是由“概念”在其中所起的支配作用。概念绝不是必然要同某个感觉上可以识别的可以再现的符号（词）绑在一起，但是，如果发生了这样的情况，思维就变得可以交流了。

人们会问，在没有努力给出任何证明之前，这个人有什么权利，在这样一个有问题的领域里，如此轻率而简单地运用观念？我的辩护是：我们的一切思维，在本性上都是概念的一种自由游戏；至于这种游戏的合理性在于，在它的帮助下，我们能够更好地理解我们的感觉。“真理”这个概念尚不能用于这样的结构，我认为，只有在这种游戏的要素和规则已经取得了深刻的认同或约定的时侯，这个概念才可以使用。



相对论　埃舍尔　木版画　20 世纪

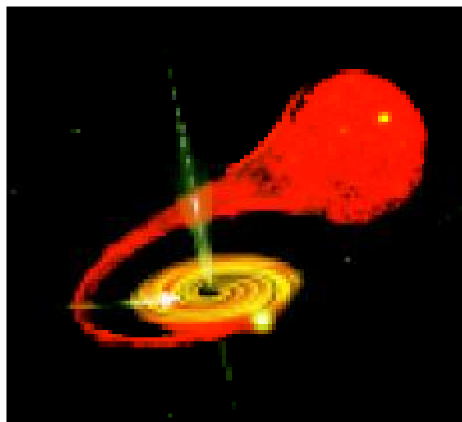
任何事物都是相对存在的。“大”是相对于已经存在的“小”而言，要说某样东西“长”，必须先有一个“短”的标准或尺度。我们直立的时候，总是以为我们的头顶上的天为上，脚下的地为下，但是由于地球是圆的，分别处于东半球和西半球的人的“上”和“下”正好相反。这些哲学观念也是爱因斯坦相对论研究的基础。图中，埃舍尔把这种相反集中到了一块儿。



我毫不怀疑，我们的思维在大多数情况下不用符号（词）也都能进行，而且在很大程度上是在无意识中进行的。否则，为什么我们有时会情不自禁地对某一经验感到“惊奇”呢？当某个经验同我们的已经充分植根在我们内部的概念世界产生冲突时，这种“惊奇”就产生了。当我们尖锐而强烈地经历这种冲突时，它就会决定性地反作用于我们的思维世界。这个思维世界的发展，在某种意义上说就是从“惊奇”的不断飞跃。

当我还是四五岁的小孩时，父亲给我看了一个指南针，那时就体验过这种惊奇。这只指南针以如此确定的方式行动，与无意识的概念世界中可能发生的那些事件（由直接“接触”所产生的效应）根本不符合。我还记得，或者至少我相信记得，这次经历给了我深刻而持久的印象。一定有什么东西深深地隐藏在事物后面。凡是人从小就看到的东西，不会引起这种反应：物体的下落，风和雨，月亮以及月亮不会掉下来这个事实，生物和非生物之间的区别，这一切他都不感到惊奇。

在12岁时，我经历了另一种完全不同的惊奇。这次惊奇来自一本关于欧几里得平面几何的小书，它是在我手里的。书里有许多命题，比如：三角形的三条高线交于一点。这些问题本身绝非自明，但是可以得到如此确定的证明，以至于对它们的任何怀疑似乎都不可能。这种明晰性和确定性给我留下了一种难以形容的印象。公理不用证明就得接受，这件事并没有使我不安。无论如何，只要能依据一些确信有效的命题来加以证明，我就完全心满意足了。比如，我记得，在这本神圣的几何学小书到我手中以前，有位叔叔就曾经告诉过我毕达哥拉斯定理。费尽周折后，我利用三角形的相似性成功地“证明了”这条定理。在证明的过程中，我视此为自明：直角三角形各个边的关系完全决定于它的一个锐角。在我看来，只有在类似方式中缺乏这种“自明性”的东西，才需要证明。此外，几何学研究的对象，与感官知觉到的对象，看来是同一类型之物，都是“能被看到和摸到的东西”。这种朴素观念（大概处于康德对“先验综合判断”之可能性的著名研究的核心），显然立足于这个事实：几何概念同直接经验对象（刚性杆、有限区间等）的关系，已经无意识地存在着。



引力场　合成图片

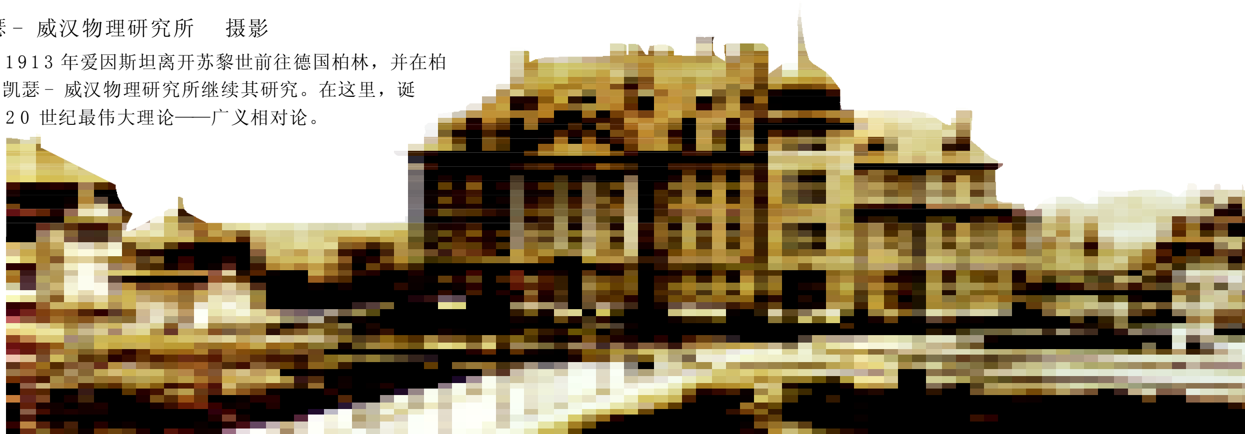
一个正在公转的黑洞的强大引力场从它的伴星扯开物质，产生了朝事件视界旋进的吸积盘。以X射线形式释放出难以置信的能量是一个黑洞的表征。

我的认识论信条

因此，如果用纯粹思维看上去就可能得到关于经验对象的可靠知识，

凯瑟－威汉物理研究所　摄影

1913年爱因斯坦离开苏黎世前往德国柏林，并在柏林的凯瑟－威汉物理研究所继续其研究。在这里，诞生了20世纪最伟大理论——广义相对论。



那么这种“惊奇”就是立足于一个错误。但是，对于第一次经验到它的人来说，在纯粹思维中竟能达到如此可靠而又纯粹的程度，好像希腊人在几何学中第一次告诉我们的那样，就已经够了不起了。

既然我已经打断了刚开了个头的讣告而且把话题扯得很远，因此，我索性在这里用几句话来陈述一下我的认识论信条，虽然有些话在前面已经顺便提过了。这个信条实际上是在很久以后才慢慢地发展起来的，而且同我年轻时候所持的观点并不一致。

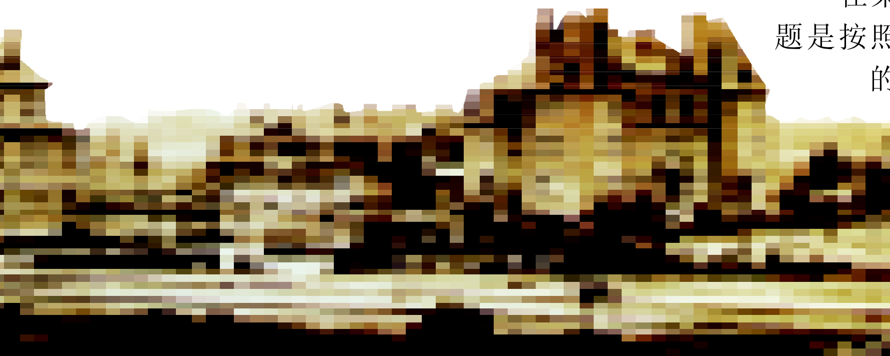


爱因斯坦的实验仪器　　摄影

爱因斯坦并不是我们想象的纯理论家，他曾花费许多时间建造仪器，用来测量大气中的微弱电量（电荷量）。图为苏黎世综合技术学院的爱因斯坦实验室的仪器。

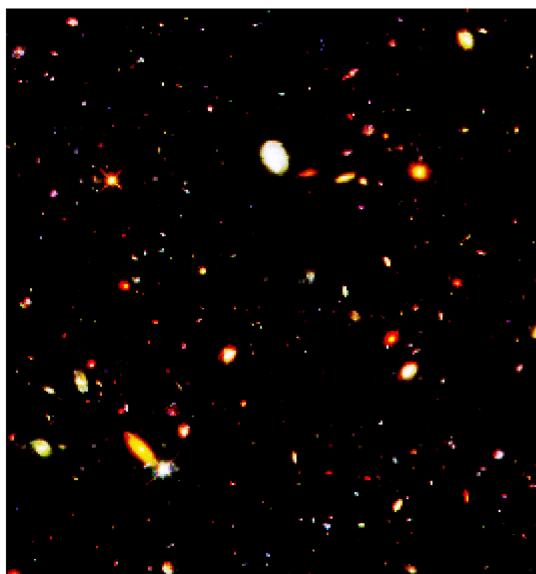
一方面，我看到感觉经验的总和；另一方面，我又看到书中记载的概念和命题的总和。概念和命题之间的关系是一种逻辑关系，而逻辑思维的任务则严格限定于按照一些既定的规则（这是逻辑学研究的问题）来建立概念和命题之间的相互联系。概念和命题只有通过它们与感觉经验的联系，才获得“意义”和“内容”。后者同前者的联系是纯粹直观，本身不具有逻辑的本性。进行这种联系或直觉联结所必须的确定性程度，不是别的，正是科学“真理”同空洞幻想的区别所在。概念体系连同那些构成概念体系结构的句法规则，都是人类的创造。虽然各种概念体系本身在逻辑上完全是任意的，它们却受到这样一个目标的限制，就是：需要同感觉经验的总和有尽可能确定的和完备的对应关系；其次，它们应当尽可能少地使用逻辑上独立的元素（基本概念和公理），即未定义的概念和非派生的假设命题。

在某一逻辑体系中，如果一个命题是按照可接受的逻辑规则推导出来的，它就是正确的。一个系统所具有的真理内容取决于它同经验总和对应之可能性的可靠性和完备性。正确的命题是从它所属系统的真理内容中取得其“真理性”的。





下面是对历史发展的一点意见。休谟清楚地意识到，有些概念，如因果性概念，是不能从经验材料用逻辑方法推导出来的。康德完全确信某些概念的独立性，他把它们当成是任何思维的必要前提，并且把它们同那些来自经验的概念加以区别。但我相信，这种区分是错误的，那就是说，它不是按自然的方式来恰当处理这个问题的。从逻辑观点看来，一切概念，即使那些最接近经验的概念，都是一些自由选择的假设。因果性概念就是这样：它首先是这些探索的出发点。



宇宙　合成图片

以太是古希腊哲学家所设想的一种宇宙媒介。17 世纪时为解释光的传播，以及电磁和引力现象又重新提出。但是认为光是一种机械弹性波，其传播媒介是以太。它无所不在没有质量但有极大的刚性。

我的早期教育

现在再回到讣告上来。在12～16 岁的时候，我熟悉了数学基本原理，包括微积分原理。这期间，我幸运地接触到一些书，它们在逻辑严密性方面并不太考究，但是能够简单明了地表达主要观点。总的说来，这段时间的学习确实是令人陶醉的。好几次达到了顶点，它给我的印象之深并不亚于初等几何——解析几何的基本思想、无穷级数、微分和积分概念。我还从一部极好的通俗读物中了解到整个自然科学领域里的主要成果和方法。这部著作（伯恩斯坦的《自然科学通俗读本》，一部有五六卷的著作）几乎完全局限于定性的方面。我聚精会神地读完了它。因此，当我 17 岁时作为数学和物理学的学生进入苏黎世工业大学时，我已经学过一些理论物理学了。



原子能释放　邮票

这是尼加拉瓜为纪念爱因斯坦创立的原子能释放而发行的邮票。世界各地人们以各种形式来纪念爱因斯坦对世界和物理学的贡献。

在那里，我遇见了几位卓越的老师（比如胡尔维兹、闵可夫斯基），

所以照理说，我应该有更深层次的数学训练。可是我大部分时间却是停留在物理实验室，痴迷于同经验直接接触。其余时间，我主要在家里阅读基尔霍夫、亥姆霍兹、赫兹等人的著作。我在一定程度上忽视了数学，因为我对自然科学的兴趣超过对数学的兴趣，并且还与下述奇特的经验有关。我看到数学分成许多专门领域，每一个领域都能费去我们短暂的生命。因此，我觉得自己的处境像布里丹的驴子，它不能决定究竟该吃哪一捆干草。大概是由于我在数学领域里的直觉能力不够，以至于不能区分：何为真正带有根本性的最重要的东西，何为在某种程度上可有可无的学问。此外，我在自然知识上的兴趣，无疑地更强一些。另外，我这样一个年轻学生，还不能清楚地了解，在物理学中，要想把握物理学的基本原理的更深层知识，还必须借助于最精密的数学方法。这一点，是在几年独立的科学研究工作以后，我才逐渐明白。

诚然，物理学也分成了多个领域，其中每一个领域都能耗费每个人短暂的一生，而且可能还没来得及满足人们对更深邃的知识的渴望。在这里，充斥着大量尚未充分关联的实验数据。可是，在这个领域里，我不久就学会了识别那种能导向基本原理的内容，而撇开其他许多东西不管，以免它们拥塞我的心智而使之远离精髓。当然，这里的问题是，为了考试，人们都得把这些废物统统塞进自己的脑袋，而不管自己愿意与否。这种强制的结果使我气馁，以致在我通过最后一科考试以后的整整一年内对科学问题的任何思考都深感不快。当然必须说明，我们在瑞士所受到的这种窒息科学

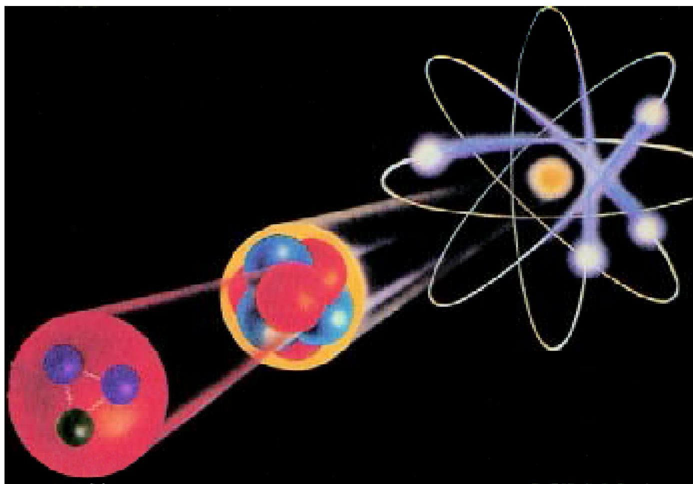


霓虹灯　摄影

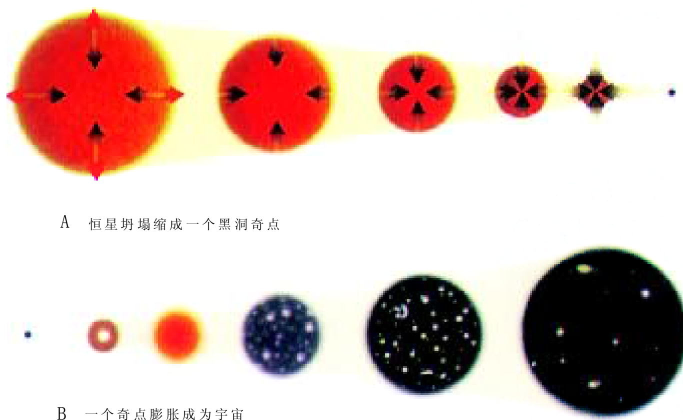
夜晚街上的霓虹灯显示着光线的不连续性。每条灯管内只含有一种原子，当这种原子被电激发时，就会放出光粒子。这些光粒子带有特定的能量，符合光量子假说。

原子结构　合成图片

1905年9月，爱因斯坦写了一篇短文《物体的惯性同它所含的能量有关吗？》，作为相对论的一个推论。质能相当性是原子核物理学和粒子物理学的理论基础，也为20世纪40年代实现的核能的释放和利用开辟了道路。此图就是原子的结构示意图。







恒星的坍缩　合成图片

利用广义相对论中光锥行为的方式以及引力总是吸引这一事实，我们可以得到恒星中的所有物质将被压缩到一个零体积的区域里，所以物质的密度和时空的曲率变成无限大。也就是说人们得到一个奇点，它被包含在叫做黑洞的时空的一个区域中。

动力的强制，相比其他地方要少许多。这里一共只有两次考试，此外，我们可以做自己愿意做的任何事情。如果能像我这样，有个朋友经常去听课，认真地整理听课笔记，那情况就更是如此了。这种情况给予人们一定的自由，以选择从事什么研究，直到考试前几个月为止。我极力享受了这种自由，并把与此伴随而来的内疚看做是微不足道的。现代的教学方法，竟然还没有完全扼杀研究问题的神圣好奇心，这简直是一个奇迹。因为这株脆弱的幼苗，除了需要鼓励以外，主要需要自由，如果没有自由，它会不可避免地夭折。认为用强制和责任感就能增进观察和探索的乐趣的做法，是一个非常严重的错误。即使是一头健康的猛兽，如果它不饿的时候用鞭子强迫它不断进食，特别是强迫吃那些经过适当选择的食物，那么，它也会丧失其贪吃的习性的。

我眼中的物理学

现在来谈当时物理学领域的情况。当时，尽管物理学在个别方面成果丰硕，但是在原则问题上居统治地位的还是那些僵化的教条：创世之初（假如有的话），上帝创造了牛顿运动定律与必需的质量和力。这就是一切。此外一切都可以用适当的数学方法演绎出来。19 世纪以此为基础所取得的成就，特别是由于偏微分方程的应用，必然会引起所有善于接受者的赞叹。牛顿也许是第一个人——在他的声传播理论中——揭示了偏微分方程的功效。欧拉奠定了流体动力学的基础。但是，作为整个物理学基础的质点力学的更加精确地发展，则是19 世纪的成就。然而，对于一个大学生来说，印象最深的并不是力学的技术性发展或者它所解决的复杂问题，而是力学在那些看起来同它无关的领域中的成就：光的力学理论，它把光设想为准刚性的弹性以太的波运动；但最重要的是气体动力学，单原子气体的比热同原子量无关，气体状态方程的导出及其与比热的关系，气体扩散的分子运动论，特别是气体的粘滞性、热传导和扩散之



间的定量关系，这种关系决定了原子的绝对量。这些结果同时证明，力学是物理学和原子假说的基础，而后者已经在化学中牢固地扎了根。但是在化学中，重要的是原子的质量之比，而不是它们的绝对大小，因此，与其把原子论看做是关于物质的实在结构的一种认识，不如看做是一种形象化的符号。此外，古典力学的统计理论能够推导出热力学的基本定律，也是令人产生浓厚兴趣的，这在本质上已经由玻尔兹曼完成了。

因此我们不必为此感到惊讶。可以说，上一世纪所有的物理学家，都在经典力学中看到了整个物理学的，甚至是全部自然科学的牢固的和决定性的基础，而且，他们还不厌其烦地试图把当时已经逐渐取得全面胜利的麦克斯韦电磁理论也建立在力学的基础之上。即使是在麦克斯韦和赫兹的自觉的思考中，也都始终坚信力学是物理学的可靠基础，而我们现在回顾起来，却可以把他们看成是这样的人——他们动摇了把力学作为一切物理学思想之最终基础的信念。是马赫，他的《力学史》推翻了这种教条式的信念。在我还是一个学生的时候，这本书就给了我深刻的影响。我认为，马赫的伟大之处，就在于他的坚不可摧的怀疑态度和独立性。在我更年轻时，马赫的认识论观点同样深深影响了我。这个观点今天看来根本站不住脚，因为他没有正确理解。所有思想，特别是科学思想，本质上都是构建性、推断性的。因此，在理论的建构——思辨特征的那些方面，正是他要指责的，比如原子动力学。

在开始批判把力学作为物理学基础以前，我先谈谈我们对物理学理论进行批判分析的某些观点。第一个观点是很明显的：理论不应当同经验事实相矛盾。这个要求初看起来似乎理所当然，但应用起来却相当微妙。因为人们常常，甚至总是可以用人为的补充来使理论同事实相适应，从而保留一种普遍的理论基础。但是，无论如何，这第一个观点要说的是：用可获得的

2 He 4.0
10 Ne 20.2
18 Ar 39.9
36 Kr 83.8
54 Xe 131.3
86 Rn 222

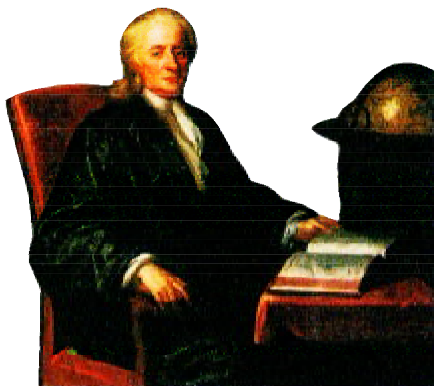
惰性气体元素表

惰性气体元素在周期表上排列在零族，其化学性质稳定，很难发生反应。惰性气体无臭，无色，无味，也不燃烧。

亚里士多德的《物理学》

亚里士多德是人类多种学科的创立者，物理学学科的名称正是来自亚里士多德这部著作的书名。亚里士多德在物理学方面的想象与一个近代学者是大不相同的。





牛顿　油画

牛顿一生的重要贡献是集16、17世纪科学先驱们成果的大成，建立起一个完整的力学理论体系，把天地间万物的运动规律概括在一个严密的统一理论中。这是人类认识自然的历史中第一次理论的大综合。以牛顿命名的力学是经典物理学和天文学的基础，也是现代工程力学以及与之有关的工程技术的理论基础。这一成就，使以牛顿为代表的机械论的自然观在整个自然科学领域中取得了长达两百年的统治地位。

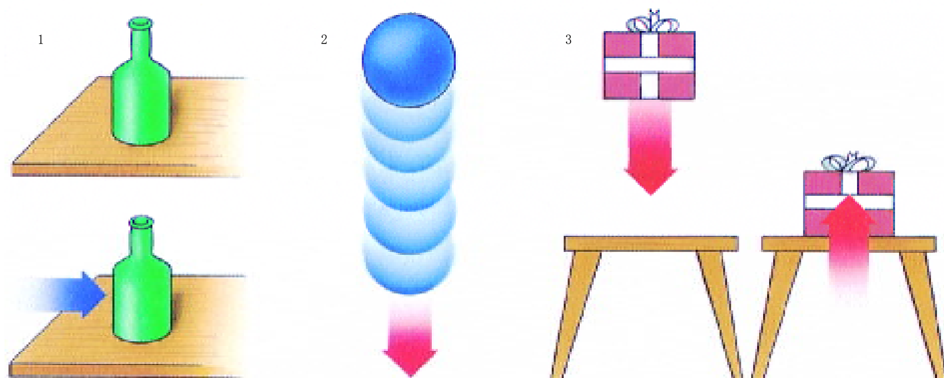
经验事实来证实理论基础。

第二个观点与观察无关，而涉及理论本身的前提（基本概念以及它们之间的关系），要求这些前提具有那种被人们简单、含糊地称之自然性或逻辑简单性的特征。这个观点在理论的选择和评价中一直起着重要作用，但是要想把它确切地表达出来却很困难。这里的问题不是列举逻辑上独立的前提的问题（如果这种列举能毫不含糊地进行的话），而是在不可比较的性质间进行相互权衡的问题。此外，在基础同样“简单”的几种理论中，那种对理论体系的可行性质限制最严格的理论（即含有最确定的论点的理论）被认为是比较优越的。这里我不需要谈及理论的“范围”，因为我们只限于这样一些理论，它们的对象是一切物理现象的整体。第二个观点可以简要地称为同理论本身有关的“内在完备性”，而第一个观点则涉及“外部确证”。我认为下面这一点也属于理论的“内在完备性”：从逻辑观点来看，如果一种理论，不是从那些等价的、结构类似的理论中任意选出的，那么这种理论就可以得到较高的评价。

我不想用篇幅不够来为上面两段话中论点的不够明确进行开脱。我必须承认，此刻我不能，也许根本就不能用明确的定义来代替这些提示。但

牛顿三大定律　合成图片

牛顿的三大运动定律的应用与力学有关。此三大定律为：①物体在未受到外力作用前，保持静止状态，或在直线上持续匀速运动。②当移动中的物体受到外力作用时，物体动量改变的时变率与所受外力成正比，且与其外力同一方向。③物体相互作用时，第一物体作用于第二物体的力和第二物体作用于第一物体的力必定大小相同，方向相反。



是，我相信，更为明确的阐述还是可能的。无论如何，我们可以看出，在判断理论的“内在完备性”时，“预言家”们的意见往往是一致的，在关于理论的“外部确证”程度的判断上，情况就更是如此了。



第五届索尔维会议者合影　摄影

1927 年第五届索尔维会议在布鲁塞尔召开，其主题是“电子和光子”。此次会议为期六天，从10 月24 日到10 月29 日。这次会议邀请了普朗克（前排左二）、爱因斯坦（前排中）等科学家参加，是最著名的一届索尔维会议。

现在来批判作为物理学基础的力学。



将所有物理学建立在力学上的尝试

从第一个观点（经验确证）来看，把波动光学纳入力学的世界图像，必将引起怀疑。如果把光解释为一种弹性体（以太）中的波动，那么以太就应当是一种可以穿透过任何东西的媒质。由于光波具有横向性，大体上类似固体，又不可压缩，所以纵波并不存在。这种以太必须像幽灵似地与其他物质并存着，因为它对“可量”的物体的运动似乎没有任何阻碍。为了解释透明物体的折射率以及辐射的发射和吸收过程，人们必须假定在这两种物质之间存在复杂的相互作用。但是人们对这件事从未尝试过，更谈不上有何成就。

此外，电磁力还迫使我们引进一种带电物质，它们虽然没有明显的惰性，却能相互作用，并且这种相互作用是极性的类型，与引力完全不同。

法拉第和麦克斯韦的电动力学，使物理学家们犹豫了很久之后，最终放弃了他们的那个信念，即所有物理学都建立在牛顿力学这个基础之上。因为电子力学理论，以及赫兹实验对它的证明，表明存在着在本质上同所有有重量物质相分离的电磁现象——它们是虚空中由电磁“场”组成的波。如果力学被作为物理学的基础，那么麦克斯韦方程就必须力学化。人们曾经努力地尝试过这项工作，而那些方程本身倒是越来越有成果。人们习惯于把这些“场”当做独立的物质来处理，而并不认为有必要去寻找它们的力学本性。这样，人们几乎在不知不觉中放弃了把力学作为物理学的基础，因为力学终于无望适应各种事实。从那时候起，两种概念要素出现了：一方面是质点以及它们之间的超距作用力，另一方

面是连续的“场”。这表明我们处于物理学的一种过渡状态，它没有一个统一的基础。这种状态虽然不能令人满意，但是，要想取代它还为时过早 。

牛顿的绝对空间

现在，从第二个观点即内在的观点出发，来对作为物理学的形而上学基础提出一些批判。在抛弃了力学基础以后，对今天的科学境况来说，这种批判仅有方法论上的意义。但是，在将来的理论选择中，当基本概念和公理距离直接可观察的东西愈来愈远，这种批判所表明的一种论点就会发挥越来越重要的作用。首先，我要提到的是马赫的论点，其实，在此之前，这早已被牛顿清楚地认识到了（水桶实验）。从纯粹几何的角度来看，一切“刚性”坐标系在逻辑上都是等价的。力学方程（比如，惯性定律）只是在某一类特殊的坐标系，即“惯性系”中才是有效的。在这类联系中，至于坐标系究竟是不是有形客体并不重要。因此，为了说明这种特殊选择的必要性，人们就必须在理论所涉及的对象（物体、距离）之外去寻找某些东西。因此，牛顿把“绝对空间”作为最初限定词引进来，让它成为一切力学过程的一个无所不在的能动的参与者。所谓“绝对”，他显然是指不受物体及其运动的影响。使这种事态特别显得不堪的是这样的事实：应当存在无限个惯性系，它们相互之间是一种均衡的、无漩涡的匀速平移运动的关系，而又区别于一切别的刚性坐标系。

测 量

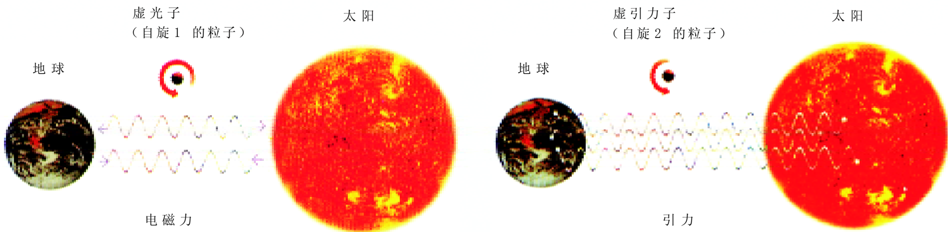
物理学也如同数学、几何学，亦需要一种定量的测量工具，这样，物理学的本质才能体现出其实际意义。





马赫推测，在一个真正合理的理论中，惯性必须像牛顿理论的其他各种力一样，取决于物体的相互作用。在很长一段时间内，我也认为这种想法是正确的。但是，它隐含的预设基本理论就应该是一般的牛顿力学：以物体和物体之间的相互作用作为原始概念。人们立刻就会发现，这种解决问题的方式与统一的场论是不相符的。

然而，从下面的类比中，我们可以



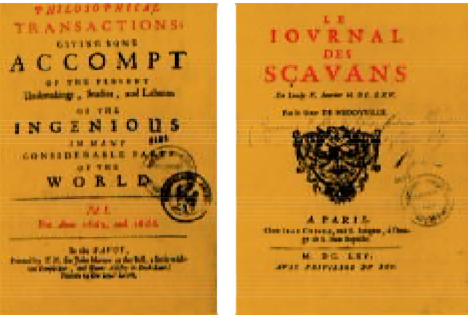
相当清楚地看出，马赫的批判在本质上是多么正确。试设想，有人想创立一种力学体系，但他们只知道地球表面上很小的部分，而看不见任何星体。他们会倾向于把一些特殊的物理属性归因于空间的竖直维度（落体的加速度方向），并在这种概念之上，就有理由认为大地大体上是水平的。他们可能不会受以下观点的影响：空间就几何特性来说，是各向同性的，那么，偏爱某个方向的物理学基本定律就是不能令人满意的；他们可能（像牛顿一样）倾向于断言竖直方向的绝对性，因为这是经验证明了的，也是人们必须接受的。较其他空间方向而言，更偏爱竖直方向，与偏爱惯性系甚于其他刚性坐标系，这两点是完全类似的。

粒子之间的力　合成图片

电磁力作用于带电荷的粒子之间，但不和不带电荷的粒子相互作用。电子存在着正负两种电荷，同种电荷之间的力是相互排斥的，而异种电荷则相互吸引。一个大的物体，譬如太阳或地球，包含了几乎等量的正负电荷。这样在地球和太阳中的粒子之间的力大部分都被抵消了。

爱因斯坦的相对论

1913 年，爱因斯坦在德国的《物理学杂志》上相继发表了许多篇关于相对论的文章，开拓了经典物理学领域的新的视野。这是爱因斯坦有关相对论文章的封面。


TRANSACTIONS
ACCOMPT
OF THE
INGENIOUS
WORLD

LE
IOVRNAL
DES
SÇAVANS
A PARIS
M. DC. LXV.

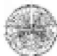
超距作用

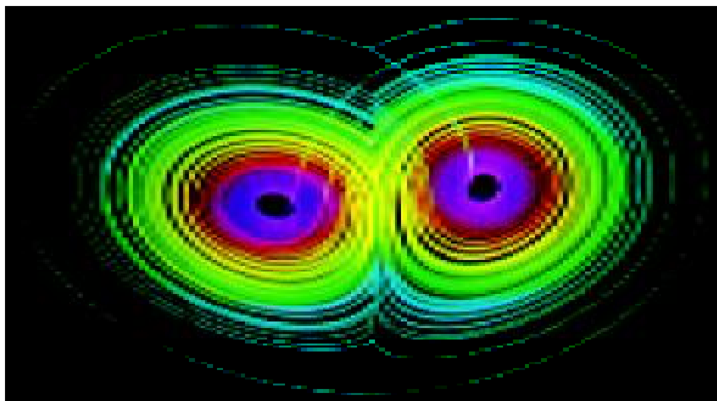
现在来讨论其他观点，它们涉及力学的内在的简单性或自然性。如果人们未经批判地怀疑就接受了空间（包括几何）和时间概念，那么他们就没有理由反对超距作用力的观念，即使这个概念并不符合人们在日常生活的原始经验基础上形成的观念。但是，还有另一个因素使得那种把力学当做物理学基础的看法显得很幼稚。力学主要有两条定律：

1．运动定律；

2．关于力或势能的表示式。

运动定律是精确的，不过在力的表示式确定以前，它是空泛的。但是，在确定力的表示式时，还有很大程度的任意性，尤其是当人们抛弃了力仅仅取决于坐标（而不依赖于其相对于时间的导数）这个本身很不自然

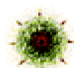




洛伦兹吸引子　合成图

洛伦兹混沌吸引子已成为混沌理论的徽标，代表着复杂性新科学，是以自组织理论、复杂性理论为标志的新型自然观。混沌首先是数学上的新发现，而非自然科学的新发现。这种表述的根据是，混沌是数学模型中存在的一种理想化的运动形式。这是大批杰出数学家多年的工作严格证明了的事实。

的要求时，更是如此。从一个点发出的引力（和电力）受势函数支配，这在理论体系内部，表达完全是任意的。补充一点：人们早就知道，这个函数是最简单的（旋转不变的）微分方程的中心对称解。因此，如果以此为线索，认为它产生于某个空间定律，这本身是可以接受的，从而可以消除选择力定律的任意性。这实际上也是使我们背离超距力理论的第一个认识，这种认识，由法拉第、麦克斯韦和赫兹做好了铺垫，以后在实验事实的压力下开始发展。





洛伦兹

洛伦兹是经典电子论的创立者。他认为电具有“原子性”，电的本身是由微小的实体组成的。后来这些微小实体被称为电子。洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质。从电子论推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用，即洛伦兹力。他把物体的发光解释为原子内部电子的振动产生的。这样当光源放在磁场中时，光源的原子内电子的振动将发生改变，使电子的振动频率增大或减小，导致光谱线的增宽或分裂。

我还要提一下这个理论的一种内在的不对称性，即在运动定律中出现的惯性质量同样也在引力定律里出现，但不在其他各种力的表示式里出现。最后我还要指出，把能量划分为本质上不同的两类（即动能和势能），必定被认为是不自然的。赫兹对此深感烦恼，因此，在他最后的著述中，他试图将力学从势能概念（即力的概念）中解放出来。

洛伦兹的大胆一步

这已经够了。牛顿啊，请原谅我。你所发现的，在你那个时代，是一位具有最好推理能力和创造力的人所能找到的唯一的道路。你所创造的概念，今天仍然指导着我们的物理学思想，虽然我们知道，要想更加深入地理解各种关系，那就必须用另外一些更加远离直接经验领域的概念来代替它们。

惊奇的读者可能会问：“这就算是讣告吗？”我要回答说：“本质上

是的。”因为像我这种类型的人，一生的精华，正是在于他所想的东西和他是怎样想的，而不在于他所做的或者所承受的。所以，这讣告可以主要限于传达一些在我的努力中起重要作用的想法。一种理论的前提越简单，它所涉及的事物的种类越多，它的应用范围越广，它就越能吸引人。因此，经典热力学给我留下了深刻的印象。我确信，在它的基本概念应用的范围之内，它是永远不会被推翻的唯一具有普遍内容的物理学理论（这一点请那些原则上是怀疑论者的人特别注意）。



在我的学生时代，最令人痴迷的是麦克斯韦理论。这个理论是从超距作用力向作为基本变量过渡的“场”的过渡，并以此显示出了革命性。光学被并入电磁理论，光速同绝对电磁单位制有关，折射率与介电常数有关，物体的反射系数与它的金属电导率之间存在着定性关系——这些好像是一种启示。除了向场论过渡，也就是，除了用微分方程来表示基本定律外，麦克斯韦只欠一个假设——在真空和电介质中引进位移电流及其磁效应。这几乎是由微分方程的形式特征预先规定了的。关于这点，我禁不住要说，法拉第—麦克斯韦这一对与伽利略—牛顿这一对之间有非常明显的内在相似性——每一对中的前者都通过直觉抓住了事物的联系，而后者则严格地用公式把这些联系表述了出来，并且定量地应用这些关系。

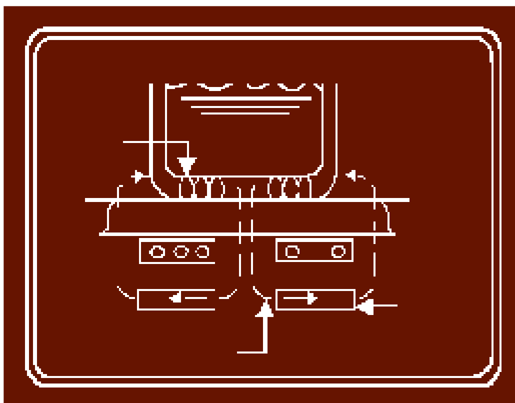


灯丝　摄影

光是光源向媒介抛射高能粒子，高能粒子与媒介粒子发生弹性碰撞而将能量传递给媒介粒子，媒介粒子之间发生连续地弹性碰撞以及发生连续地能量传递，每次碰撞的独立性和多次碰撞的连续性在宏观上表现为波动的光现象。这就是灯泡发光的工作原理。

电磁　合成图片

电磁学或称电动力学或经典电动力学。之所以称为经典是因为它不包括现代的量子电动力学的内容。电磁学的基本方程式为麦克斯韦方程组。



当时，使人难以清楚地把握电磁理论的本质的是下述特殊情况：电或磁的“场强度”和“位移”都被当做基本的变量来处理，空虚空间被认为是电介体的一种特殊形式。“场”的载体被认为是物质，而不是空间。这就

暗示了“场”的载体应该有速度，而且，这当然也适用于“真空”(以太)。赫兹的移动物体的电动力学是完全建立在这种基本观点之上的。

洛伦兹的伟大功绩在于，他在这里以令人信服的方式完成了一个变革。按照他的观点，原则上“场”只能存在于虚空之中。被认为是由“原子”组成的物质，则是电荷的唯一基体；物质的粒子之间是空虚空间，它是电磁场的基体，而电磁场是由那些位于物质粒子上的点电荷的位置和速度产生的。介电常数、传导率等等，只取决于那些组成物体的粒子之间的力学联系的种类。粒子上的电荷产生“场”，另一方面，“场”又以力的方式作用于粒子的电荷上，这里按照牛顿运动定律决定电荷的运动。如果人们拿这个与牛顿体系进行对比，那么其革新处就在于：超距作用被“场”所取代，而“场”能同时解释辐射。引力由于比较小而不予考虑，但是，通过扩充场的结构，即扩充麦克斯韦场定律，总有可能将引力包括在内。现在这一代物理学家认为，洛伦兹所得到的观点是唯一可能的。但在当时，这确实是一个惊人的大胆的步骤，要是没有它，就不可能有以后的发展。

如果人们批判地来看理论发展的这一阶段，那么他们就会注意到这个二元论，即表现在牛顿意义上的质点同作为连续区的“场”，彼此并列地被作为基本概念。动能和场能看上去是两种根本不同的东西。按照麦克斯韦理论，用运动电荷的磁场代表惯性，这就更加不能令人满意。那么，为什么不是惯性的总和呢？那样的话，剩下的只有场能了，而粒子只不过是一个场能特别高密度的区域。在这种情况下，人们可以希望，质点的概念以及粒子的运动方程都可以由场方程推导出来——那个令人烦恼的二元论就会消除了。

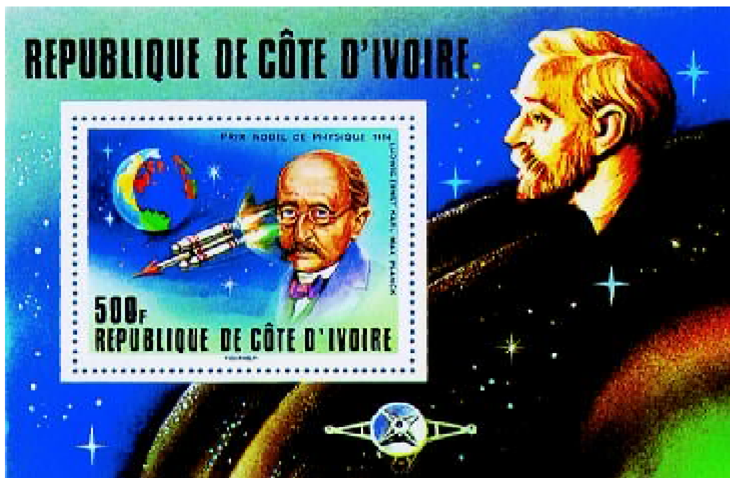
洛伦兹对此了解得很清楚。可是从麦克斯韦方程不能推出构成粒子的电的平衡。只是另一种非线性场方程才可能做到这一点。但是，不冒武断的危险，就无法发现这种场方程。



莱顿大学　摄影

莱顿大学于1575年始建于荷兰古城——莱顿，是荷兰历史上最古老并首获认可的第一所常规大学，目前也是欧洲排名第二的历史悠久的大学。莱顿大学治学严谨、研究水平极高。

无论如何，人们可以相信，在法拉第和麦克斯韦如此成功地开创的道路上，为所有找到一个新的可靠基础将逐步变得可能。



普朗克　邮票

这是象牙海岸为纪念普朗克发现量子理论而成为1918年诺贝尔奖得主发行的邮票。

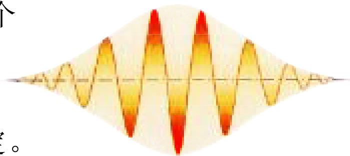
量子的发现

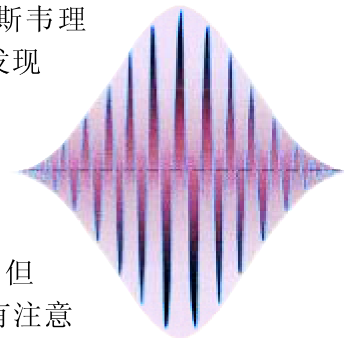
因此，由于“场”的引进而开启的这场革命，绝没有结束。在世纪交替时期，发生了同我们刚才讨论的事情无关的基本危机，由于麦克斯·普朗克对热辐射的研究（1900年）使人们突然意识到它的严重性。这个事件的历史由于下边的事实而值得注意：至少在开始阶段，它并没有受到任何惊人的实验发现的影响。

在热力学的基础上，基尔霍夫得出这样的结论：在一个器壁温度为T的不透光的容器内，辐射的能量密度和光谱组成与器壁的性质无关。这就是说，单色辐射的密度是频率和绝对温度的普适函数。这就引起了一个有趣的问题：如何决定这个函数。关于这个函数，在理论上我们可以确定些什么呢？根据麦克斯韦理论，辐射必定会对腔壁产生一个压力，这个压力由总能量密度决定。从这点出发，玻尔兹曼用纯粹热力学方法推出：辐射的总能量密度同T成正比。从而他为早先已由斯藩根据经验发现的定律找到了理论根据——他将这条经验定律同麦克斯韦理论的基础联系了起来。此后，维恩运用麦克斯韦理论，在热力学上进行了创造性的思考，同时也发现了含有两个变量的普适函数的精美形式。两个普适常数之一导致了量子论。

普朗克假设合成图片

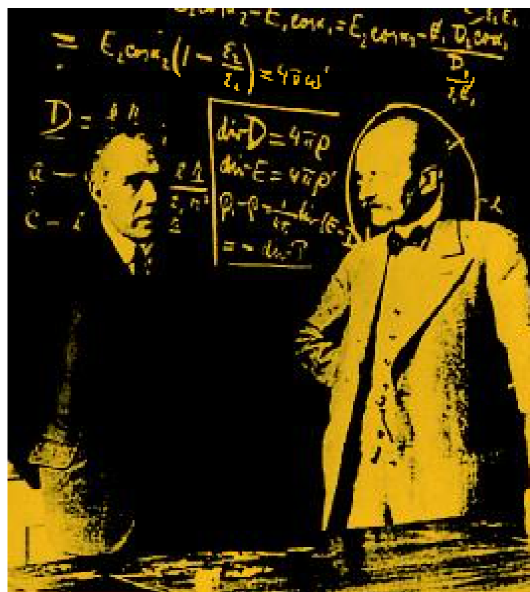
普朗克认为，光波、X射线等都不能以任意速率辐射，而是要以一定的波包形式出现，而这个波包是与它的频率成比例的能量的一串波。





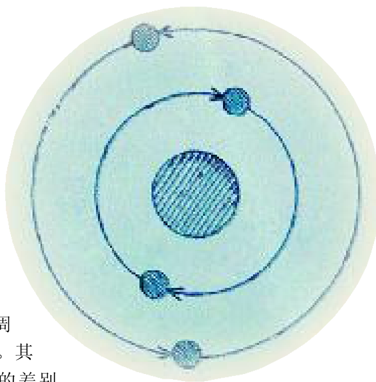
普朗克公式中的一个常量准确地给出了原子的真实大小。

普朗克清楚地意识到这是一个伟大的成功。但是这里有一个严重的缺陷，幸而当初普朗克没有注意



玻尔与普朗克　摄影

玻尔（左）在普朗克的量子理论基础上提出了原子的定态假设和频率法则，这些理论的建立促进了近代物理学的进一步发展。



玻尔的原子模型 合成图片

玻尔学说指出原子就像一个微型的太阳系，电子在重核周围的轨道上旋转。其中一个极其重要的差别就在于经典物理学定律认为行星轨道的大小可以是任意的，而玻尔假定原子的电子只能在某些大小确定的轨道上旋转，只有轨道半径使整个原子的全部角动量是普朗克常数的倍数时才有可能，而中介值则不行。每个确定的轨道都具有与其相关的确定能量。当一个电子从一个确定的轨道跃迁到另一个确定的轨道时，辐射出来的光的频率就等于能量的变化再除以普朗克常数。玻尔对原子结构的研究使他获得了1922年的诺贝尔物理学奖。

到。由于同样的考虑，应当要求普朗克公式同样适用于低温状态。然而，如果真的这样的话，这个公式也就完蛋了。因此，从现有的理论看，正确结论应当是：气体理论给出的振子的平均动能是错误的。那就意味着否定了（统计）力学，或者由麦克斯韦理论得出的振子的平均动能是错误的，那就意味着放弃了麦克斯韦理论。在这种情形下，最可能的是，这两种理论都只有在有限的范围内是正确的，此外则不然。后边的情况确实如此。如果普朗克得出了这样的结论，就不会有他的伟大发现了；因为这样就剥夺了他的纯粹思考的基础 。

现在回到普朗克的推理。根据气体分子运动论，玻尔兹曼已经发现，除去常数因子外，熵等于我们所考察的状态的“几率”的对数。通过这种观点，他认识到在热力学意义上过程是“不可逆”的。然而，从分子力学的观点来看，所有过程都是可逆的。如果人们把由分子论定义的状态叫做微观描述的状态，或者简称为微观状态，而把由热力学描述的状态称为宏观状态，那么，有无数个状态属于宏观状态。这种想法之所以显得格外重要，是由于它的适用范围并不局限于以力学为基础的微观描述。普朗克意识到了这一点，并且把玻尔兹曼原理应用于一种由很多具有同样频率的振子所组成的体系。宏观状态是由所有这些振子振动的总能量决定，而微观状态则取决于单个振子的瞬时能量。因此，为了能用一个有限的数来表示属于一个宏观状态的微观状

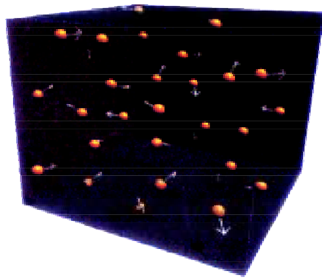
态的数目，普朗克把总能量分成大但个数有限的同质能量元，并且问，在振子之间有几种方式分配这些能量元？于是，这个数目的对数就决定了系统的熵，并因此（通过热力学）决定了系统的温度。如果普朗克为他的能量元选取值，他就得到了辐射公式。这种思考方式不能使人清楚地看出，它同推导过程所依据的力学和电动力学的基础是相矛盾的。可是实际上，推导过程暗含了能量只能在固定大小的“量子”被单个振子吸收和发射。也就是说，可振动的力学结构的能量以及辐射能量，都只能在这种量子中传递。这是与力学定律和电动力学定律相违背的。这与动力学的矛盾是基本的，而与电动力学的矛盾可能没有那么基本。因为辐射能量密度的表示式虽然与麦克斯韦方程相容，但它并不是这些方程的必然结果。以这个表示式为基础的斯蒂芬－玻尔兹曼定律和维恩定律与经验相符合，这就表明这个表示式提供了重要的平均值。

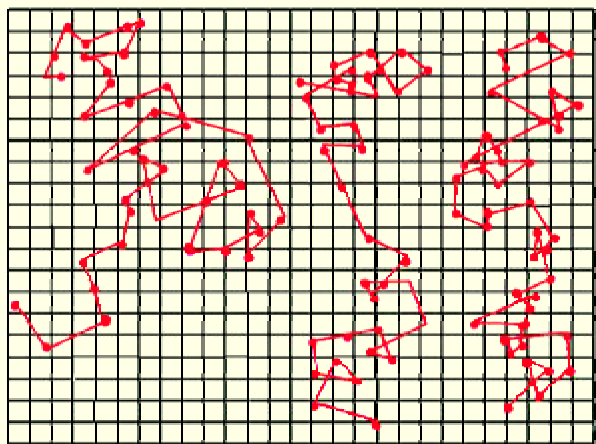


普朗克的基本思路发表后不久，上述一切我都已十分清楚。因此，尽管没有出现经典力学的代替理论，我还是能看出，这条温度－辐射定律，为光电效应，为其他同辐射能量的转换有关的现象，为固体的比热（比热容），带来了什么结果。可是，我所做的使物理学的理论基础同这种认识相适应的一切尝试都失败了。这就像脚下的土地都被抽空后，人们看不到任何可以在上面建筑的巩固基地。这个摇晃不定且自相矛盾的基础，竟足以使一个像玻尔那样独特直觉和敏锐思维的人发现光谱线和原子电子壳的主要定律，以及它们对化学的意义。这件事对我来说是一个奇迹，即使是今天，在我看来仍然如此。这是思想领域中最美妙的韵律。

布朗运动　合成图片

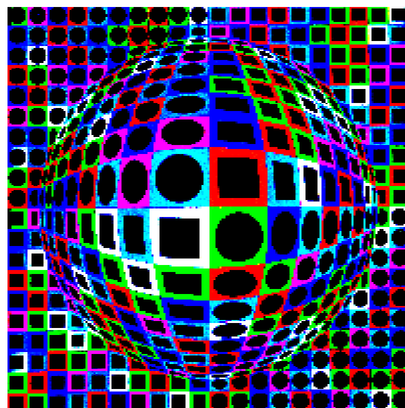
微小粒子表现出的无规则运动就是布朗运动。苏格兰物理学家布朗在1827年于显微镜下观测到，水中的花粉和其他悬浮的类似大小的颗粒不停地做无规则的折线运动。以后，人们发现在温度均匀和无外力作用的流体中都能观测到微粒的这种运动，从而把它称为布朗运动。





布朗运动和原子的实在性

虽然普朗克的工作所取得的具体结果可能非常重要，但在那个年代里，我的兴趣不在于此。我所关心的主要问题是：从关于辐射结构，或者更一般地说，从关于物理学的电

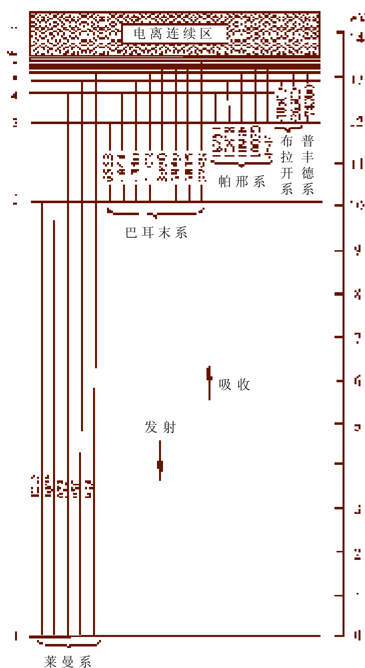


Vega-Gyongly-2
瓦萨雷利　版画

从二维到三维，闭曲线不能把三维空间分成两部分。至少从目前看来，二维到三维是关键的推广，这一推广一下子把确定论和随机论的界限打破了。此幅图中画家通过画面上从二维到三维的转变，运用对比的透视法，让人看到似是而非的幻象。

氢原子的光谱区各种线系　合成图片

氢原子是最简单的原子，从氢气放电管可以获得氢原子光谱，这种光谱在可见区和近紫外线区有许多谱线，构成一个有规律的系统，谱线的间隔和强度都向短波方向递减。图为氢原子的光谱区各种线系。

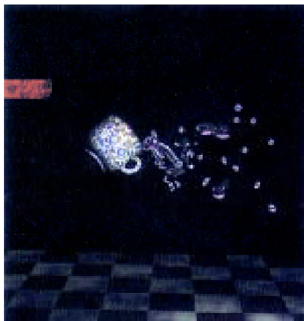


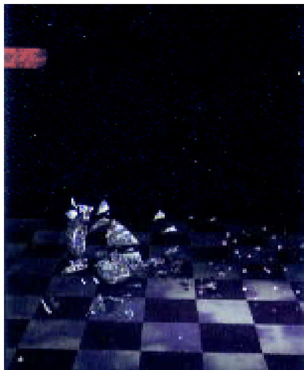
磁基础的辐射公式中，我们能够得出什么样的普遍结论呢？在深入讨论这个问题之前，我必须简要地提到关于布朗运动及有关课题（波动现象）的一些研究。它们主要是以经典分子力学为基础的。玻尔兹曼和吉布斯的研究早已发表，而且已经把问题彻底解决了，但我对这些并不知晓。于是，我发展了统计力学，以及以此为基础的热力学的分子运动论。我这么做，主要是要找到一些事实，尽可能确证那些确定的有限大小的原子的存在。这时我发现，按照原子论，一定可以观察到的一种悬浮微粒的运动。而我并不知道，关于这种“布朗运动”的观察早已是人所共知了。最简单的推论是以如下的考虑为根据的。如果分子运动论确实是正确的，那么那些可见的粒子的悬浮液就一定也像分子溶液一样，具有符合气体定律的渗透压。这种渗透压同分子的实际大小有关，亦即同一克当量中的分子个数有关。如果悬浮液的密度不均匀，那么各处的渗透压也会因此而不同，这就会引起一种趋向均匀的扩散运动，这能从已知的粒子迁移率计算出来。但另一方面，这种扩散也能被看做是悬浮粒子因热骚动而引起的。最初我们并不知道无规偏移的大小。通过对比，由两种不同的推导方式所得出的扩散电流的数值，人们就可以定量地得到这种位移的统计定律，也就是布朗运动定律。这些研究与经验相一致，以及普朗克根据辐射定律测定了分子的真实大小，这使得当时许多怀疑论者相信了原子的实在性。这些学者对原子论的敌对态度，无疑可以溯源于他们的实证主义哲学立场。这是一个有趣的例子，它表明即使是那些有冒险精神和敏锐直觉的学者，也可能因为哲学上的偏见而妨碍他们对事实做出正确解释。这种



杯子破碎　电脑合成图片

在日常生活的实践中，前进和后退还是有较大的差异。比方说，我们看一个杯子在地面上破碎的录像，我们很容易知道该录像是朝前放还是往后退，然而科学定律对时间是向前进还是向后退都是相同的。





偏见尚未消失，它相信，无须借助概念构造，事实本身就能够而且应该为我们提供科学知识。这种误解之所以可能，只是因为人们很难认识到对这些概念的任意选择：经过长期、成功使用，这些概念看上去同经验材料直接相关。

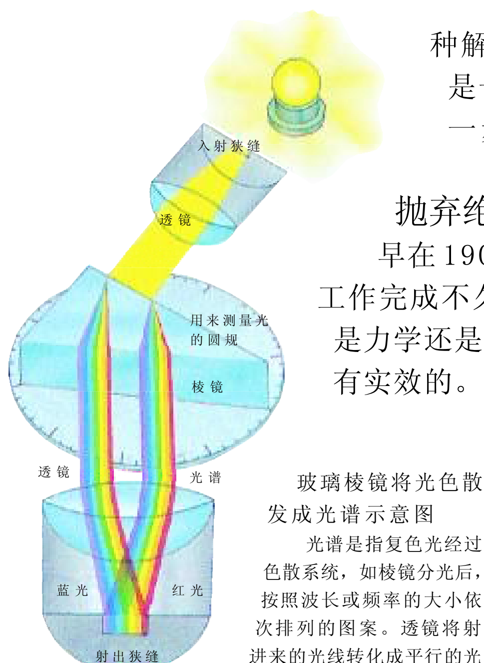
布朗运动理论的成功再一次表明：当速度对时间的高阶求导小到可以忽略不计时，把经典力学用于这种运动，其结果总是可靠的。根据这种认识，我们可以利用一种比较直接的方法，从中求得一些关于辐射结构的知识。我们可以这样论证：在充满辐射的空间里，一块（垂直于自身平面）自由运动着的准单色反射镜，必定要做一种布朗运动。如果辐射不受局部波动的支配，镜子就会逐渐静止，因为，由于它的运动会导致它的正面的辐射要比背面的多。可是由于组成辐射的波束互相干扰，作用于镜子上的压力必定会有某种不规则的波动。这种波动都能够从麦克斯韦理论计算出来。为了能够得到这个结果，人们必须假定另一种类型的压力变化。这种方法以激烈而直接的方式表明，普朗克的量子必须被认为是一种直接的实在，因而，从能量角度来看，辐射必定具有一种分子结构。这显然与麦克斯韦理论相矛盾。直接依据玻尔兹曼的熵概率关系（概率等于统计的时间频率）对辐射所作的研究也得到同样的结果。辐射的（和物质微粒）这种双重性是实在的一种主要性质，它已经由量子力学以相当巧妙而且非常成功的方式作了解释。在当时，几乎所有物理学家都认为这

奥布宁斯克电站　摄影

一般来说，地球上的一切物质是由肉眼看不见的原子组成的，而原子又是由电子和原子核组成的。原子核在分裂或聚合时能释放出巨大的能量，这就是核能。虽然原子核小得连肉眼都看不见，可是储存在它里面的能量却大得惊人：1克铀裂变时所释放的核能竟与2.5吨煤耗所具有的热量相当。利用核能的这种本领，科学家们设计建成了发电量可观的核电站。图为世界上第一座核电站——奥布宁斯克核电站。



种解释是最终答案，但在我看来，它仅仅是一条权宜之计。后面我们将对这点做进一步论述。



玻璃棱镜将光色散发成光谱示意图

光谱是指复色光经过色散系统，如棱镜分光后，按照波长或频率的大小依次排列的图案。透镜将射进来的光线转化成平行的光束；光束经过棱镜形成光谱；第二个透镜再将光谱聚集到射出狭缝。图为光线的色散示意图。

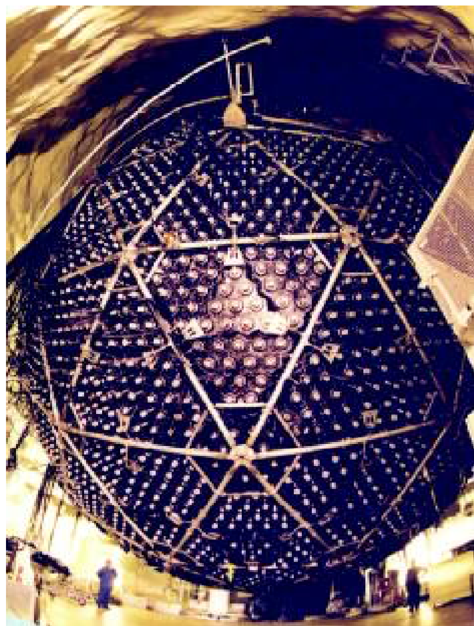
抛弃绝对同时性

早在1900年以后不久，也就是普朗克的开拓性工作完成不久，这类思考已让我清楚地看到：不论是力学还是电力学（除非在极限情况下）都不是确有实效的。渐渐地，我对那种根据已知事实用创造性的努力去发现真实定律的可能性丧失了信心。我努力得愈久，越拼命，就愈加确信：只有发现一个普遍形式的原理，我们才能得到可靠的结果。热力学就是我面前的一个范例。在热力学中，普遍原理是用这样的定理形式给出的：自然规律是这样的，它们使得建造（第一类和第二类）永动机成为不可能。但是怎样找到这样一条普遍原理呢？经过十年沉思以后，我从一个悖论中发现：如果我以速度 c（真空中的光速）追随一条光线，那么我就应当看到，这样一条光线虽然在空间里振荡，却像一个停滞不前的电磁场。可是，无论是依据经验，还是按照麦克斯韦方程，这样的事情都不会可能发生。从一开始，直觉告诉我，从这样一个观察者的立场进行判断，任何事物都应当按照同样的一些定律进行，像一个相对于地球是静止的观察者所看到的那样。因为，第一个观察者怎么会知道，或者确定，他自己是处在均匀的快速运动状态中呢？

人们发现，这个悖论已经包含着狭义相对论的萌芽。时至今日，谁都知道，只要时间或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在人们的潜意

中微子探测器　摄影

中微子特别难测，但是它们在核聚变反应中会大量产生，如果能从核反应堆中找到中微子的踪迹，那么，就能证明中微子的存在。图中显示的是一个巨大的中微子探测器，科学家利用它来寻找中微子。



识里，那么任何想要令人满意地澄清这个悖论的尝试，都注定要失败。清楚地认识这条公理以及它的任意性，就已经蕴涵着问题解决的关键。对我来说，发现这个要点所需要的批判思想，是在阅读了休谟和马赫的哲学著作之后而得到了决定性的进展。

人们必须清楚地了解，在物理学中一个事件的空间坐标和时间点值意味着什么。空间坐标的物理学解释，预设了一个刚性参照物，而且，这参照体必须处在某种程度上确定的运动状态中（惯性系）。在一个既定的惯性系中，坐标就用（静止的）刚性杆作表示某些测量的结果（人们始终应当知道，假设原则上存在刚性杆，这来自一种由近似经验的暗示，但这个假设在原则上是任意的）。由于这样一种对空间坐标的解释，欧几里得几何的有效性问题便成为一个物理学上的问题了。

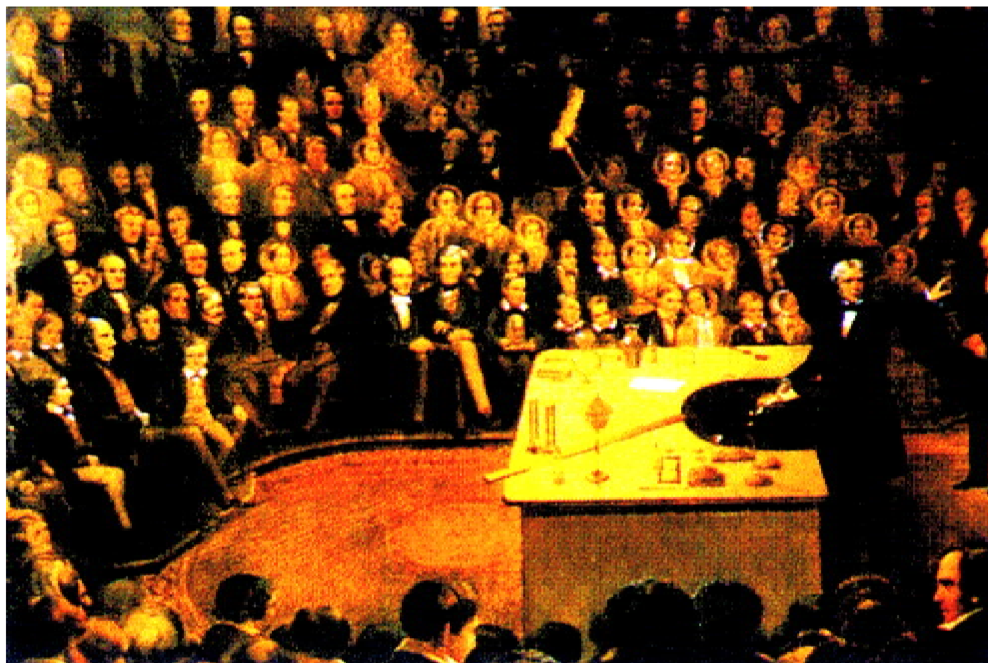
这样，如果人们想用类似的方法来说明一个事件的时间，那就需要一种量度时间差的工具（这是一个内在决定的周期过程，是借助一个空间广延足够小的体系来实现的）。一只相对于惯性系是静止的钟定义了一个

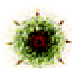
能量　沃迪克·休德马克　1975 年

物理中的能量概念必蕴涵在物理的结构体系之中，因此，能量概念必首先标明其在物理结构中的位置。能量作为物理量的应用，其不能是孤立的，必然和其他的物理概念存在着物理体系上的结构关系。因此，能量和与之相关的物理概念存在逻辑联系，也同时决定着它在物理中的结构与属性。

普朗克尺度理论

每个娃娃代表对自然的小到某一尺度的理解。每个娃娃都包含一个更小的娃娃，后者对应于描述更小尺度的自然理论。但在目前的物理学中存在一个假定的最小尺度，即普朗克长度，这是自然可以用 M－理论描述的尺度。





法拉第演讲　油画　19 世纪

图中是法拉第于1856年在英国皇家学会作演讲。他为了推广科学，曾经在公开场合作演说。听众头脑中的旧有知识，正接受法拉第的新知识挑战。其中也有冒昧的反对者，但最终法拉第的科学新知识被世界所接受。

“当地时间”。如果已有一种尺度去“校准”所有的钟，那么，所有空间点的当地时间组合在一起，就是给定的惯性系的“时间”。人们看到，这样定义的“时间”在不同的惯性系中不必彼此一致。假如，对于人们日常的实践经验而言，光不被用来确定绝对同时性（因为光速的数值很大），那么，人们早就该注意到这一点了。

对原则上存在（理想的，或完美的）量杆和时钟的假定是彼此相关的，如果关于真空中光速恒定不变的假设不导致矛盾，那么，在刚性杆两端之间来回反射的一个光信号就构成了一只理想的时钟。

对狭义相对论的认识

上述悖论可以表述如下。根据经典物理学，事件之空间坐标和时间从一个惯性系转移到另一个惯性系时相互关联；这些关联规则，使得下面两条假定互不相容（尽管两者各自都是以经验为基础的）：

1．光速不变；

2．定律（尤其是光速不变定律）同惯性系的选取（狭义相对性原理）无关。

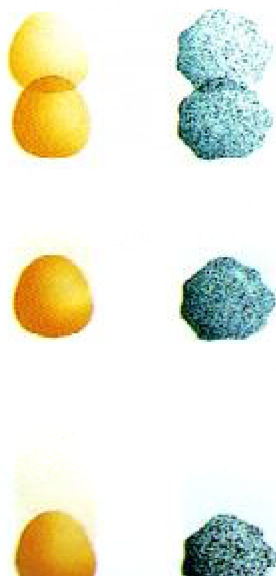
狭义相对论最基本的认识是：如果事件的坐标和时间的变换呈现一种新的关系（“洛伦兹变换”），那么这两个假定就彼此相容了。考虑到既定的关于坐标和时间的物理学解释，这绝不仅仅是普通的一步，而且还包

含着某些关于运动着的量杆和时钟的实际行为的假说，而这些假说可以被实验证实或者推翻。

狭义相对论的普遍原理包含在这个假定中：关于洛伦兹变换（从一个惯性系向其他任意一个惯性系的转换）的物理学定律恒常不变。这是对自然法则的一条限制性原理，它可以同那条作为热力学基础的关于永动机不存在的限制性原理相比拟。

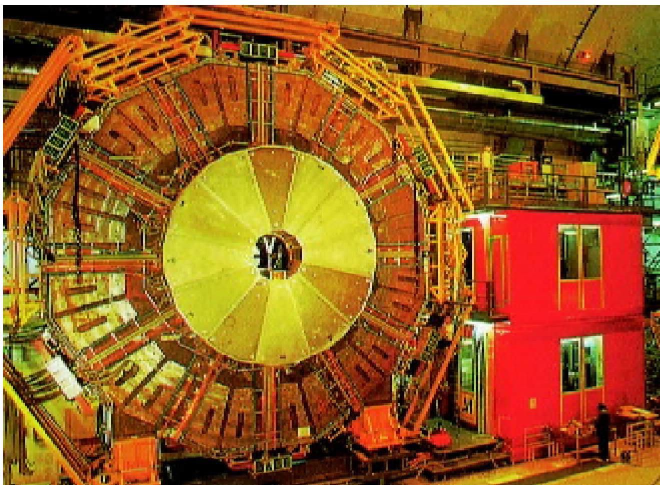
首先说明一下这理论与“四维空间”的关系。一个流行的谬误认为，狭义相对论似乎应该在一定程度上首先发现了，或者至少以新的方式引进了物理连续区的四维性。事实并非如此。经典力学也是建立在空间和时间的四维连续区之上的，但是在经典物理学的四维连续区中，时间值恒定的截面有绝对的实在性，即与参照系的选取无关。因此，四维连续区就自然而然地分化为一个三维和一个一维（时间），所以，四维的观点对于人们就不是必需的了。与此相反，狭义相对论使作为一方的空间坐标与作为另一方的时间坐标在进入自然规律的过程中，产生了一种形式上的依存关系。

闵可夫斯基对这一理论做出了重要贡献。在他之前，人们还必须进行一次洛伦兹变换来检验一条定律在这种变换下的不变性；闵可夫斯基成功地引进了这样一种形式体系，使定律的数学形式本身就能保证它在洛伦兹变换下的不变性。通过创造一个四维张量演算，普通的矢量演算能从三维空间中获得的东西，他同样能够从四维空间获得。他还指出，洛伦兹变换（除去因时间的特殊性质而造成的正负差异）仅仅是坐标系在四维空间中的转动。



重力　合成图片

重力是一种最常见的力，人类生活在地球上，时时刻刻都受到重力的作用。地球和月亮之间存在相互吸引的力，这个力跟地球吸引地面的物体使物体下落的力是同一种力，即万有引力。

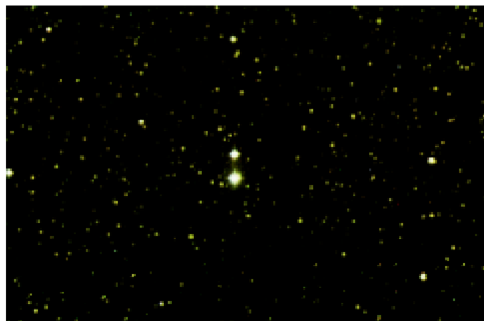


加速器　摄影

这是建立在日内瓦附近的CERN的ALEPH检测器的一个终端盖子。在这种加速器中进行高能粒子碰撞，研究者可以创造和存在与大爆炸之后类似的条件。



首先，让我们对上述理论提一点批评性意见。人们注意到，这理论（除四维空间外）引进了两类物理学的东西，即：①量杆和时钟；②其余一切东西，比如电磁场、质点等等。这在某种意义上是不一致的。严格地说，量杆和时钟应当表现为基本方程（由运动着的原子所组成的客体）的解，而不是似乎理论上独立的实体。可是这种做法可以理解，因为一开始就很清楚，这理论的假设不够有力，还不足以从其中推导出完全独立且能充分排除任意性的关于物理事件的方程，并以此为基础来建立量杆和时钟的理论。如果人们不愿放弃一般意义上的关于坐标的物理解释（这本来是不可能的），那么，最好还是包容这种不一致性，当然，我们有责任在以后的理论发展中把它消除。但是，人们不应当把上述缺点合法化，以致把距离想象为本质上不同于其他物理量的特殊类型的物理实体（“把物理学还原为几何学”等等）。



恒星天鹅X－1　天文摄影

假设一个黑洞是一个双星系统的一部分，与其伴星共同绕同一引力中心转动，该伴星是一颗普通的恒星。如果黑洞与其伴星靠得非常近，那么伴星上的物质就会一点一点被黑洞夺过去，并形成一个环绕黑洞的物质盘，被称为吸积盘。吸积盘里的物质会沿螺旋轨道落入黑洞，并在进入黑洞的过程中放射出X射线。1965年，人们在天鹅座探测到一个特别强的X射线源，将它命名为天鹅X－1。照片中心附近的两个恒星更亮的那个就是天鹅X-1，它被认为包含一个黑洞和一个正常恒星。

质能关系　合成图片

质量与能量的关系是相对论的一个重要结果，被爱因斯坦总结在著名的质能方程式中。科学家利用这个方程式来解释粒子加速器将原子核分裂开时其中的能量亏损以及质量、能量间的关系。



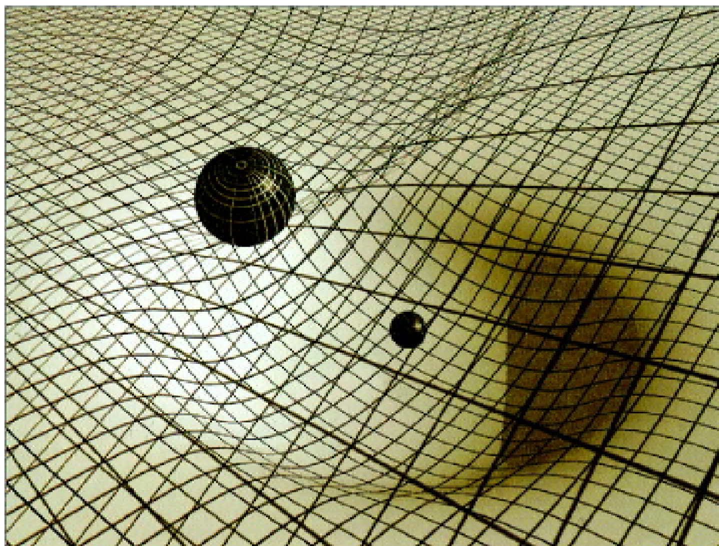
我们现在来看，物理学中有哪些具有确定性的认识应该归功于狭义相对论。

1．在不容地点发生的事件之间没有同时性，因而也就没有牛顿力学意义上的直接超距作用。虽然，根据牛顿力学，引入以光速传播的超距作用还是可行的，但是却显得很不自然。因为在这样的一种理论中，不可能有能量守恒原理的任何合理陈述。因此，不可避免地要用空间的连续函数来描述物理实在。所以，质点就不能再被认为是理论的基本概念了。

2．动量守恒定律和能量守恒定律融合并成为单独的一条定律。封闭体系的惯性质量就是它的能量，

因此，质量不再是一个独立的概念了。

光速c在物理方程中是作为“普适常数”出现的物理量之一。可是，如果用光走过1厘米的时间作为时间单位，来代替秒，那么c在这方程中就不再出现。在这个意义上，我们说，常数c只是一个表面上的普适常数。



时空弯曲

宇宙里没有平坦的道路，没有平坦的时间。人们习惯上的一维时空被爱因斯坦重新描述，他否定了绝对的时空。如果一个大质量的物体将时空弯曲，因此将在它邻近的物体的道路上形成弯折，加速度和引力才是等效的。

有一点很明显，而且是大家所公认的，如果适当选取“自然”单位（比如电子的质量和半径）来代替克和厘米，那么还可以从物理学中消去另外两个普适常数。

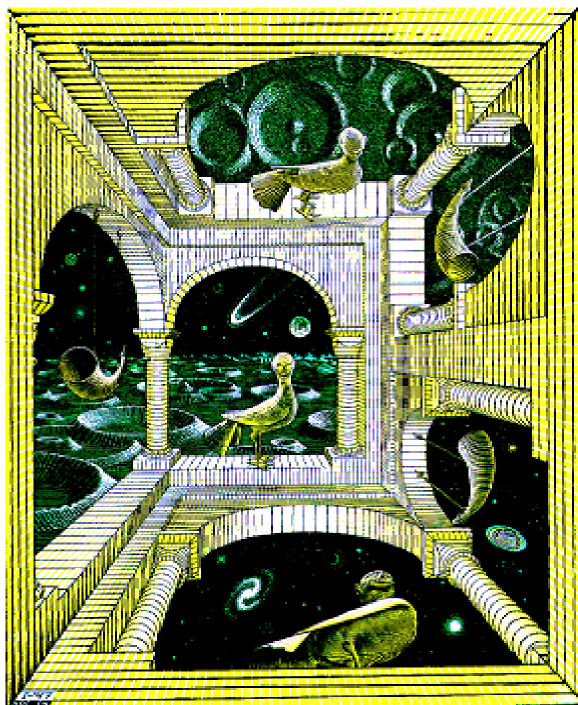
如果我们这样做了，那么在物理学的基本方程中就只有“无量纲”常数了。与此相关，我想讲这样一条命题，它目前仅仅建立在对自然的简单性或可理解性的信念上。这命题就是：这种任意的常数是不存在的。也就是说，自然界就是这样构成的。它使得人们制定一些强决定性定律在逻辑上成为可能；在这些定律中，只有完全被理性确定了的常数（不是那些在不破坏这种理论的情况下其数值也能改变的常数）才能出现。

狭义相对论及其超越

狭义相对论的起源要归功于麦克斯韦的电磁场方程。反过来，后者也只有通过狭义相对论，才能在形式上以令人满意的方式被人们理解。麦克斯韦方程是从矢量场导出的反对称张量假定的最简单的洛伦兹不变场方程。假如我们没有从量子现象中知道麦克斯韦理论不能正确解释辐射的能量特性，那么这个理论本来是会令人满意的。但是，如何才能自然地修改麦克斯韦理论呢？对此，狭义相对论也没有提出足够的根据。而且它也不能回答马赫的问题：为什么惯性系在物理学中比其他坐标系更具有特殊性？

当我试图在狭义相对论的框架下表示引力的时候，我才完全明白，狭





异度空间　埃舍尔　版画

正确与错误都是相对的，并且它们之间相互联系。图中，埃舍尔构造了一个奇异的房子，每两个窗户结成一组。每一组独立上看去都是相对的，但是对比着看就会发现很大问题，这就是我们眼中的事物的相对性。

义相对论仅仅是必然发展的第一步。在用“场”来解释的经典力学中，引力表现为一种标量场（具有单一分量的、理论上最简单的场）。首先，引力场的这种标量理论，很容易做到对于洛伦兹变换群保持不变。因此，下述纲领看来就自然了：物理场的总体由一个标量场（引力场）和一个矢量场（电磁场）组成。以后的认识也许会逐渐引入一些必要的更加复杂的“场”，但是开始时人们还不需要为此担心。

然而，实现这个纲领的可能性从一开始就受到怀疑，因为这个理论必须同时具备以下性质：

1．对狭义相对论的一般研究表明，物理学体系的惯性质量随其总能量的增加而增加（比如随动能增加而增加）。

2．根据非常精确的实验，尤其是根据厄缶的扭秤实验，可以非常精确地得出这个结果：物体的引力质量与惯性质量完全相等。

从1和2可以得知，一个体系的重量明显地取决于它的总能量。如果理论不能满足这一点，或者不能自然地做到这一点，我们就应当抛弃这个理论。这种情况最自然的表述方式是：在某一既定的重力场中，自由下落系统的加速度与这下落系统的本性（特别是它的能量含量）无关。

事实表明，在这个纲领所描绘的框架下，根本不能，或者无论如何不能以自然的方式来满意地表现这个简单的情况。这点使我相信，在狭义相对论的结构中，不可能有令人满意的引力理论。

现在我知道，惯性质量与引力质量相等，也就是引力加速度同落体的本性无关这件事，可以表述如下：在一个（小空间范围）引力场里，如果我们引进一个参照系来取代“惯性系”，而这个参照系是相对这个惯性系做加速运动的，那么在这个“场”中，事物就会像在没有引力的空间里那样行动。

这样，如果我们把物体相对后一参照系所做的运动看做是由“真实的”（而不只是表面的）引力场引起的，那么像原来的参照系一样，我们就把这个参照系看做是一个“惯性系”，并且与原来的参照系有同样多的合理性。

因此，如果人们深入研究引力场的物理学可能性，而且这个引力场不是先验地受到空间界限的限制的话，那么，“惯性系”这个概念就变得完全空洞了。这样，“相对空间加速度”的概念连同惯性原理、马赫悖论也都失去了任何意义。



爱因斯坦与相对论　　摄影

人们在广义相对论中只能调整引力强度和宇宙常数，但是这两个调整不足以取消所有的无限大。

（下）原子论演化　　合成图片

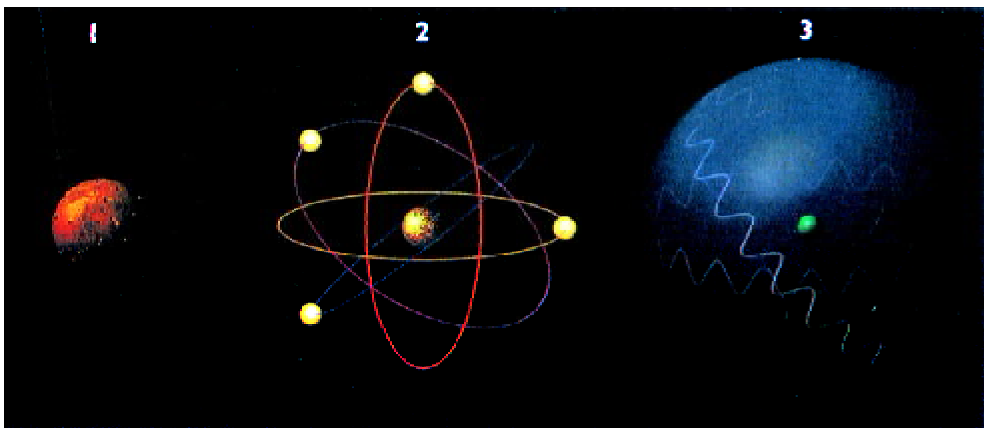
图中通过三个原子模型演示了原子论的发展变化。1 是希腊哲学家德谟克里特的颗粒状原子；2 是卢瑟夫的电子绕核公转模型；3 是薛定谔的量子力学模型。

我是如何得到广义相对论的

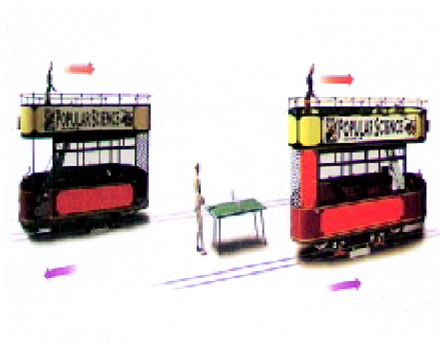
惯性质量同引力质量相等这个事实，很自然地使人认识到，狭义相对论的基本假设（在洛伦兹变换下这些定律的恒常性）是太狭窄了，也就是说，我们必须假设，定律的不变性与四维连续区中的坐标的非线性变换相关。

这发生在 1908 年。为什么还需要 7 年时间来建立广义相对论呢？其主要原因在于：要从坐标必须有直接的度规意义这一观念中解放出来很不容易。这个转变大体上是以如下方式发生的。

我们先设想一个没有“场”的空虚空间，在狭义相对论的意义上，对于一个惯性系来说，它是我们可以想象的最简单的物理状况。现在我们设想引进一个非惯性系，这新的参照系相对于惯性系（在三维的描述中）在一个（传统意义的）方向上做匀加速运动，于是，相对于这个参照系，



就有一个静止的、平行的引力场。这时，这参照系可以是刚性的，并具有欧几里得性质的三维度规关系。但是，那个“场”出现静态的时间，却不是用构造相同的静止的钟来量度的。从这个特例中，我们可以认识到，一旦容许坐标的非线性变换，那么坐标也就失去了直接的度规意义。可是，如果人们想要通过这个理论的基础适当处理引力质量与惯性质量相等的事实，并且想克服马赫关于惯性系的悖论，那么，我们就必须容许坐标的非线性变换。



但是，如果现在必须放弃坐标系的直接的度规意义（坐标的差 = 可测的长度或时间），人们就只能将一切由坐标的连续变换所能造成的坐标系都当做是等价的。

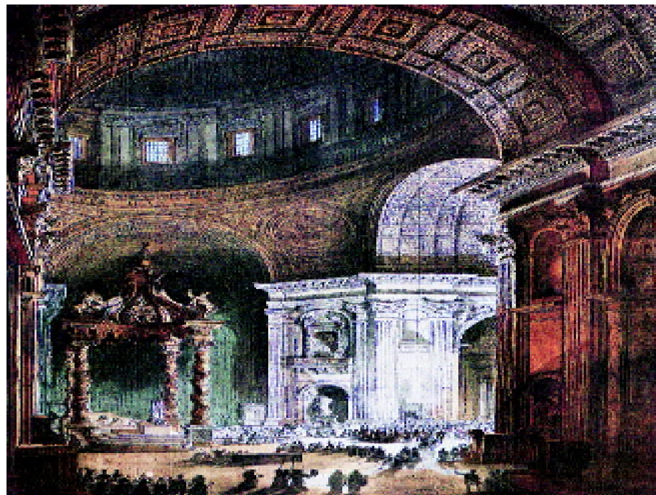
因此，广义相对论就由下述原理出发：自然规律要用那些在连续的坐标变换群下协变的方程来表示。这个群代替了狭义相对论的洛伦兹变换群，而洛伦兹变换群也成了前者的一个子群。

行星的运动　合成图片

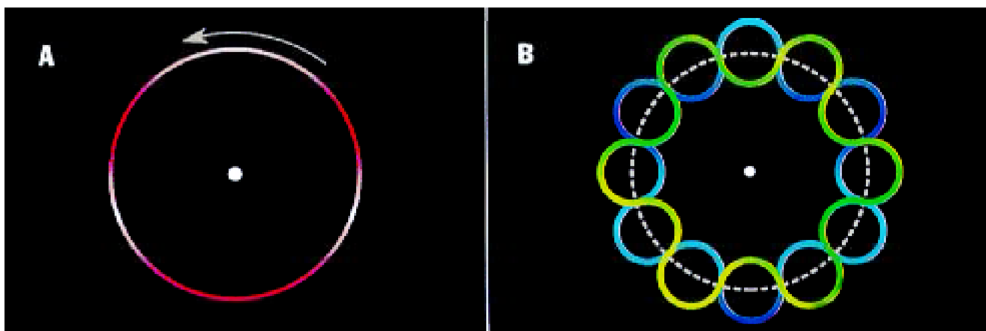
一位在围绕着太阳公转的地球（蓝色）上的观察者在星座背景下观看火星（红色）。行星在天空中的复杂表观运动可由牛顿定律解释，而毫不影响个人的命运。

轮赌盘　摄影

温伯格－萨拉姆理论是关于力的弱作用和电磁作用的统一理论，它表明在低能量下一些看起来完全不同的粒子，事实上只是同一类型粒子的不同状态。在高能量下所有这些粒子都有相似的行为。这个效应和轮赌盘上的轮赌球的行为相类似。在高能量下（当轮子转得很快时），这球的行为只有一个方式，即不断地滚动。然而当轮盘缓慢下来，球就会停到37个不同位置中的一个上。



这种要求本身，当然不足以充当推导物理学基本方程的出发点。起初，人们甚至于会否认这个假设本身真正限定了物理规律。因为对于最初只是针对某些坐标系而规定的定律，总有可能重新加以表述，使新的表述方式具有广义协变性。进一步说，一个当下自明的事实是，可以建立无限多个具有这种协变性特征的场定律。但是，广义相对性原理的著名的启发性意义就在于，它引导我们去探求那些具有尽可能简单的广义协



电子轨道模型　合成图片

1924 年，法国贵族青年德布罗意推理说，电子与质子的微粒也能像波一样运动。这一公式为波动力学奠定了基础，这一理论标新立异地坚持物质与能量只不过是同一亚原子微粒的不同状态。图片 A 表现了旧的电子轨道模型，图片 B 表现了新的波状电子轨道模型。



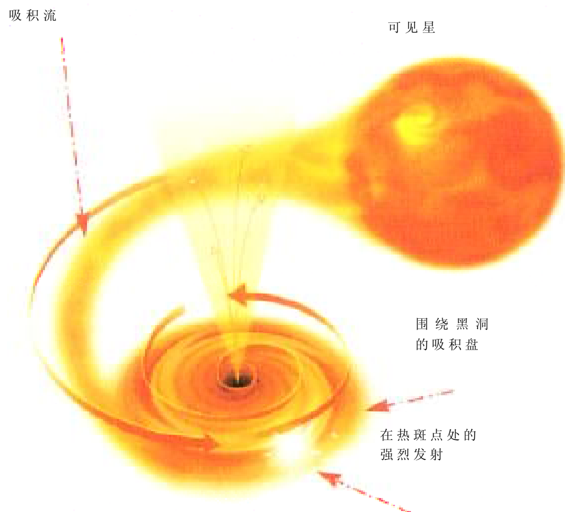
变形式的方程组，我们应当从这些方程组中找出物理空间的场定律。通过这样的变换进行相互转换的“场”，都表现了同样的实在状况。

对所有在这个领域里探索的人们来说，他们的主要问题是：可以用来表示空间的物理性质（“结构”）的量（坐标的函数）是属于哪一种数学类型？然后才是，这些量满足于哪些方程？

这些问题的答案至今还不确实可靠。广义相对论的最初表述的途径可以做如下选择。我们还不知道该用何种场变量（结构）来表征物理空间，但是我们确实知道一种特殊情况，那就是狭义相对论中的“没有场”的空间。

现在谈谈关于“场”结构和“变换”群的一般性看法。显然，一般说来，人们会这样来判断一个理论：作为理论的基础的“结构”愈简单，场方程不变性满足群的范围愈广，那么这理论也就愈完善。现在人们可以看出，这两个要求是彼此互相冲突的。比如，按照狭义相对论（洛伦兹群），人们可以为可想象的最简单的结构（标量场）建立一条协变定律，而在广义相对论（范围较广的坐标连续变换群）中，存在着一个只适用于较复杂的对称张量结构的不变场定律。对此，我们已经提出了物理学说明。物理学中，必须要求范围较广的群的不变性。根据纯数学的观点，我看不出有必要为较宽广的群而牺牲较简单的结构。

广义相对论的群首次要求，最简单的不变性定律的场变数及其导数不再是线性的、齐次的。这一点非常重要。如果场定律是线性的（和齐次的），那么，两个解之和也是一个解，比如麦克斯韦场方程在虚空中的就是这样。在这样一种理论中，人们不可能只从场定律推导出分别代表系统各个解的结构之间的相互作用。因此，到现在为止的所有理论中，除场定律外，还需要有物体在场作用下运动的特殊定律。在相对论的引力论中，固然除场定律外，最初还独立地假定了运动定律（短程线）。可是，人们后来发现，这条运动定律并不需要（也不应该）独立假定，因为它



X 射线示意图

物质从可见星的表面被吹起来，当它落向不可见的伴星之时，发展成螺旋状的轨道，并且变得非常热而发出X 射线。

已经隐含在引力场定律之中了。

这种复杂情况的本质可以形象地表述如下：一个单一的静止质点可以用一个各处（除该质点所在的地点以外）有限且匀称的引力场来表示。可是，如果利用场方程的积分来计算属于两个静止质点的“场”，那么，这个“场”除了在两个质点所在地点上有两个奇点外，还有一条连接两点的奇点曲线。可是，人们可以这样来规定质点的运动，以至于除质点所在地点以外，由这些质点所决定的引力场各处都不是奇异的。这些正是牛顿定律在第一级近似下所描述的运动。因此，人们可以说，物体以这样的方式运动，以致除质点外，场方程的解在任何地方都不会出现奇点。引力方程的这种属性，同方程的非线性直接有关，而这种非线性又源自范围较广的变换群。

现在，人们当然可能会这样反对：如果允许在质点所在地点出现奇点，那么有什么理由可以禁止在空间的其他地方也出现奇点呢？如果引力场方程被看做是总场的方程，那么，这种反对意见就应当是合理的。可是，情况并非如此，人们必须说，物质质点的“场”越接近粒子所在点，这个场就越不是纯粹的引力场。如果人们有总场的场方程，那么势必要求粒子本身都可以被描述为完备的场方程的没有奇点的解。只有这样，广义相对论才是一种完备的理论。

量子理论的将来

在讨论如何完成广义相对论这个问题以前，我必须对这个时代最成功的物理理论，即统计性量子理论，表明我的态度。25 年以前，

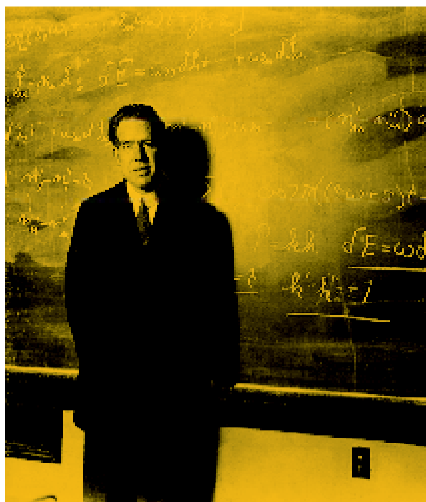




不同形状的星系　合成图片

宇宙中星系的形状是不同的。银河系是一个具备围绕其核心的旋臂的漩涡星系。银河系旋转一圈大约需花费二亿二千五百年。另一种类型的漩涡星系是棒漩涡星系。椭圆形星系就好像失去旋臂的漩涡星系，而有一些没有特定外形的星系则被称为是不规则的星系。

这种理论就已经由薛定谔、海森堡、狄拉克和玻尔给出了统一的逻辑形式。现在，它是能对经验到的微观力学事件的量子特征提供统一理解的唯一的理论。一方是这个理论，另一方是相对论，两者在一定意义上都被认为是正确的，虽然迄今为止想把它们融合起来的一切努力都没有成功。这也许就是在当代理论物理学家中对未来物理学的理论基础将会如何这个问题存在着完全不同观点的原因。它会是一个场论吗？或者，它本质上是一种统计性的理论？在这里，我将简单地说一下我对这个问题的想法。



尼尔斯·玻尔　摄影

尼尔斯·玻尔于1913年发表了关于原子结构的量子理论，它从根本上改变了科学家们认为原子粒子是不可见的看法，并坚持不懈地进行研究，将经典物理学的概念与量子物理的抽象概念紧密结合起来。



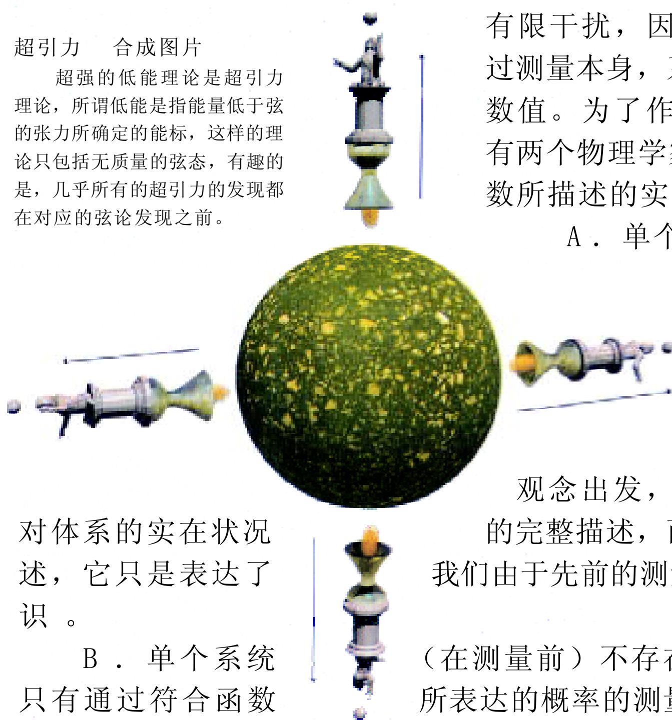
物理学是从概念上把握实在的一种努力，至于实在与是否被观察，则被认为是无关的。人们就是在这个意义上谈论“物理实在”的。在量子力学以前，对如何理解这一点，并没有疑惑。在牛顿的理论中，实体是由空间和时间里的质点来表示的。而在麦克斯韦看来，实体是由时空中的“场”决定的。在量子力学中，情况就不那么容易看得清楚了。如果有人问：量子理论中的函数，是否正像一个质点系或者一个电磁场一样，表示一个实际状况呢？那么，人们就会犹豫不决，不敢简单地回答“是”或者“否”。为什么？因为，函数（在一个确定的时刻）所陈述的是：如果我在时间 t 进行量度，那么在一段确定的已知时间中能找到一个确定的物理量 q 的概率是多少？在这里，这个概率被看做是一个可以在经验上测定的，因而确实是“真实的”量，只要能够经常造出同样的函数，并且每次都能进行测量，我也许能测定它。但是，每次测得的值是怎样的呢？有关的单个体系是否在量度前就已经有这个值呢？对于这些问题，现存的理论框架里，没有明确的回答。因为，测定是一个过程，这确实意味着外界对系统施加



漩涡星系　棒漩涡星系

超引力　合成图片

超强的低能理论是超引力理论，所谓低能是指能量低于弦的张力所确定的能标，这样的理论只包括无质量的弦态，有趣的是，几乎所有的超引力的发现都在对应的弦论发现之前。



有限干扰，因此，可以想象，只有通过测量本身，系统才能获得一个确定的数值。为了作进一步的讨论，我设想有两个物理学家A和B，他们对量子函数所描述的实在状况持有不同的见解。

A．单个系统（在测量前）对于一切变量，都具有一个确定的 q（或 p）值，而且，这个值就是在测量这个变量时所得到的。从这种观念出发，他会说：量子函数不是对体系的实在状况的完整描述，而仅仅是一种不完备的描述，它只是表达了我们由于先前的测量而获得的关于系统的知识。

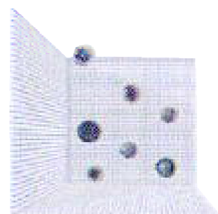
B．单个系统（在测量前）不存在确定的 q（或 p）值。只有通过符合函数所表达的概率的测量行为本身，才能得出这个值。从这种观念出发，他将会（或者，至少可以）说，函数是对系统真实状况的一种穷尽的描述。

现在我们向这两类物理学家展示出下面这类情况。有一个系统，在我们观察的时刻 t，由两个局部系统组成，而且在这个时刻，这两个局部系统在空间上是分开的，彼此（在经典物理学的意义上）也没有多大相互作用。根据量子力学，这整个系统可以用一个已知的函数完全描述。

现在，我觉得，人们可以谈论局部系统的真实状况了。起初，在对系统一进行测量以前，我们对这个真实状况的了解，比我们对一个由函数描述的系统的了解还少。但是，照我的看法，我们应当无条件地坚持这样一个假定：体系的真实状态，同我们对那个在空间上同它分开的系统所采取的措施无关。对于同一个实在状况，可以（按照人们对选择哪一种量度）找到不同类型的函数（人们只有通过下述办法才能避开这种结论：要么假定对量度会用传心术的办法改变实在状况，要么根本否认空间上互相分开的事物能有独立的实在状况。在我看来，两者都是完全不能接受

普朗克常数　合成图片

普朗克常数 h 这个作为空间上的一个依据，为什么它的单位却是以能量（物质）和时间的单位的乘积为单位呢？ 这是分析力学中作用量的单位（当然也是角动量的单位），因此被称做作用量子。可以用费曼的方程来解释，指数项没有单位因此 h 与作用量有相同的量纲。当然，很多量纲是由历史原因造成的。



粒子位置的不确定性

×



粒子速度的不确定性

×



粒子质量

= 不小于普朗克常数

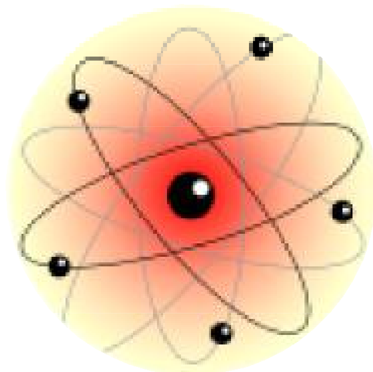
的）。

如果现在物理学家A和B认为这种推理是有效的，那么B就必须放弃他的立场，即认为函数是关于实在状况的一种完备的描述。因为，在这种情况下，系统二的同一个实在状况，不可能与两种不同类型的函数相对应。

因此，量子力学对系统的不完全描述必然会导致目前理论的这种统计特征，而人们也不再有任何理由可以设想未来物理学的基础必须建立在统计学上。

我不同意其他物理学家的地方

我认为，如果给出一些确定的概念，当前的量子理论主要来自经典力学的基本概念，形成了一种对联系的最适宜的表述方式。可是，我相信这个理论不能为将来的发展提供任何有用的起点。正是在这一点上，我的期望与当代多数物理学家有极大的分歧。他们相信，这样一个理论，用满足微分方程的空间的连续函数来描述事物的实在状态的那种理论，不可能解释量子现象（一个体系的状态的变化，表面上不连续，时间上不确定，能量基本载体同时具有粒子性和波动性）的本质特征。他们同样认为，人们以这种方式无法理解物质和辐射的原子结构。相反，他们料到，为这样一种理论特意考虑的微分方程体系，根本不会有那种有四维空间里各处均匀（没有奇点）的解。但是，他们首先相信，只有通过一个本质上是统计性的理论，才能描述基本过程表面上的非连续性，因为这理论中，用可能状态的概率的连续变化来解释系统的非连续变化。

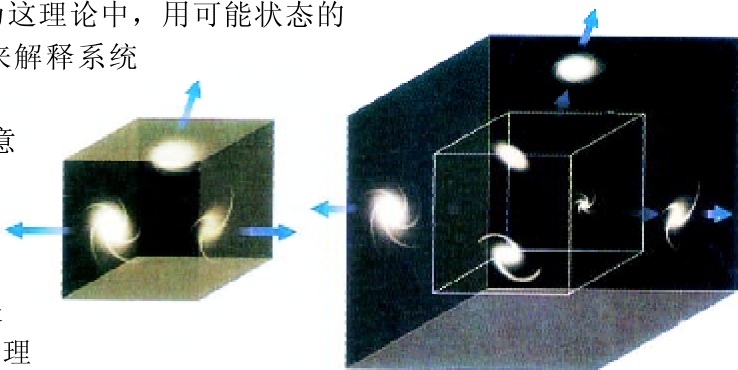


量子力学　合成图片

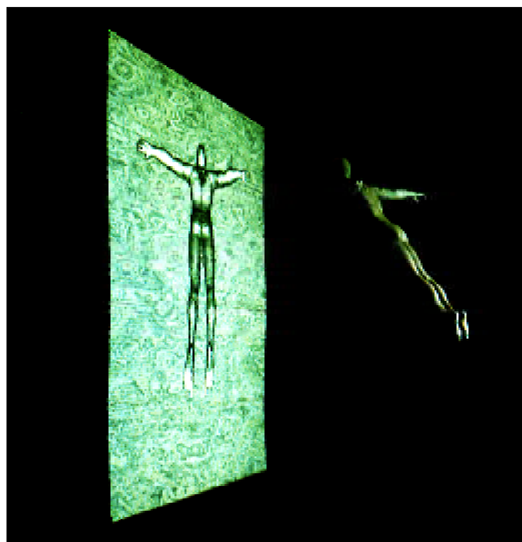
量子力学是物理学的一个重要分支，它研究和描述的是一些简单微粒——原子、分子、原子核及微观现象的运动规律。20世纪一系列伟大的技术成就就是建立在量子力学的基础之上，如核反应堆，量子力学在很大程度上已经成为一门工程科学。

宇宙的扩张　合成图片

稳态理论认为当星系互相离开时，在它们中的间隙又正在连续产生新物质，不断形成新的星系。因此在空间的所有地方以及在所有的时间，宇宙看起来是大致相同的。

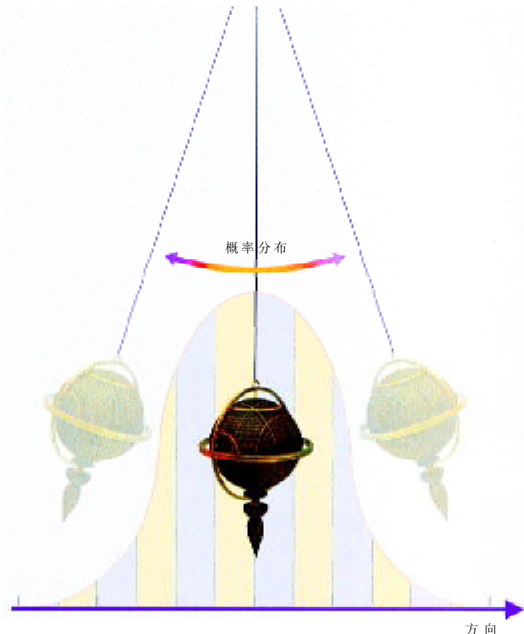


所有这些意见，给我留下了十分深刻的印象。但在我看来，下面的问题才应该是事情的症结：就物理



全息术　合成图片

全息术把一个空间区域的信息编码到一个低一维的面上。一个黑洞的事件视界的面积是它的内部状态数的测度这一事实显示，全息原理似乎是引力的一个性质。在膜世界模型中，全息术是在我们四维世界的态和高维的态之间的一一对应。从实证主义的观点看，人们不能区分何种描述更为基本。



具有概率分布的摆　合成图片

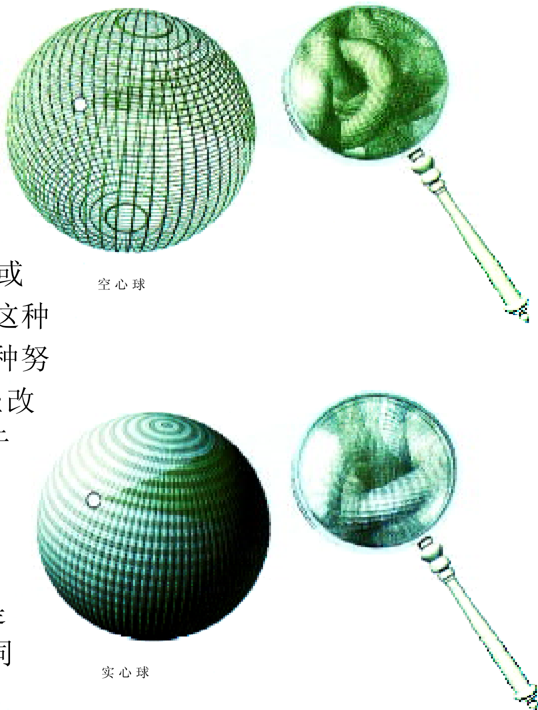
根据量子理论，一个单摆的基态或者最低能量的态，都必须具有最低的涨落。这意味着摆的位置由概率分布给定。在它的基态，最可能的位置是直接指向下方，但是它还具有在和垂直夹一小角度上被找到的概率。

学理论的当前情况而言，可以做哪些尝试才有成功的希望？在这个问题上，引力论中的经验指明了我的期望方向。在我看来，这些方程，比所有其他物理方程更有希望告诉我们一些准确的东西。比如，人们可以拿它与虚空的麦克斯韦方程作比较。这些方程符合我们关于无限弱的电磁场的经验。这个经验根源决定了它们的线性形式，可是，前边已经强调指出，真正的定律不可能是线性的，而且也不可能从这些线性方程中得到。我从引力论中还学到了其他东西：经验事实不论收集得多么全面，都不可能帮助人们提出如此复杂的方程。一个理论可以用经验来检验，但是经验中没有通往理论的道路。像引力场方程这样复杂的方程，只有通过发现逻辑上简单的数学条件才能找到，这种数学条件完全地或者几乎完全地决定了这些方程。一旦找到了那些足够强的形式条件，那么，人们只需要少量的事实知识就可以构造这个了；在引力方程这个例子中，表示四维性和空间结构的对称张量，连同对连续变换群的不变性，这些几乎就完全决定了这些方程。

我们的任务是为总场找到场方程。所求的结构必须是对称张量的某种一般化。它所满足的群的范围一点也不比连续坐标变换群狭小。如果人们引入一个更为丰富的结构，那么这个群就不会像在以对称张量为结构时那样强

地决定这些方程了。因此，如果人们能够做到类似于从狭义相对论到广义相对论所采取的步骤，把群再一次扩充，那就是最美好了。我曾特别尝试过利用复数坐标变换群。所有这样的努力都没有成功。我曾经公开地或隐蔽地放弃了去增加空间维数，这种努力最初是由卡鲁查开始的，这种努力至今还有其拥护者，虽然已经改头换面了。我们应该把自己限定于四维空间和连续的实数坐标变换群 。

空间结构的推广，从我们的物理知识的观点看来，似乎也是很自然，因为我们知道，电磁场同反对称张量有关。



宇宙起源的膜世界图像　合成图片

此图描绘了宇宙起源的膜世界图像。因为稍变平坦的四维球面或者果壳不再是空心的，而且被第五维充满。

在引力理论中最重要的是，对于一个既定的对称的“场”，可以定义一个“场”，它的下标是对称的。从几何学来看，它支配着矢量的平移。与此相似，对于非对称的，可以按照公式来定义一个非对称的。这公式同对称的相应关系是符合的，自然只是在这里才有必要注意它的下标的位置。

如果这些叙述向读者说明了我毕生的努力是怎样相互联系的，以及这些努力为什么已导致一种确定形式的期望，那就已经达到目的了。

爱因斯坦写于1946年





发现行星　油画　18 世纪

CONTENTS

目录

xiangduilun

编译者语……………………………………………1

相对论简史（代序）……………………………1

爱因斯坦讲述《相对论》—— 编者导读 ……… 2

第一章 狭义相对论

1.1 几何命题的物理意义 ………………………… 2

1.2 坐标系 ……………………………………… 9

1.3 经典力学中的空间和时间 ………………… 15

1.4 伽利略坐标 ………………………………… 22

1.5 相对性原理（狭义）……………………… 27

1.6 经典力学中的速度相加定理 ……………… 45

1.7 光的传播定律与相对性原理的表面抵触 …… 47

1.8 物理学的时间观 …………………………… 58

1.9 相对性的同时性 …………………………… 68

1.10 距离概念的相对性 ……………………… 74

1.11 洛伦兹变换 ……………………………… 76

1.12 量杆和钟在运动时的行为 ……………… 89

1.13 速度相加法则 斐索实验 ……………… 97

1.14 对相对论启发作用的评估 ……………… 106

1.15 一般相对论的普通结果 ………………… 111

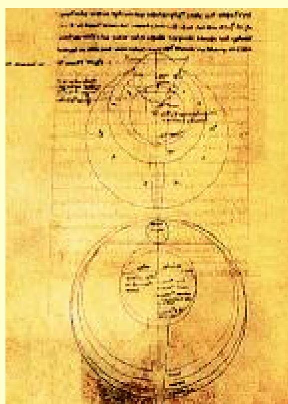
1.16 经验和狭义相对论 ……………………… 118

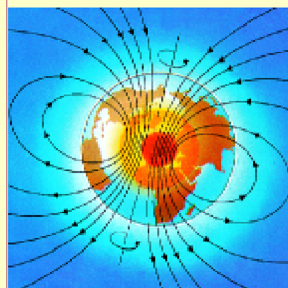
1.17 闵可夫斯基四维空间 …………………… 130

第二章 广义相对论

2.1 狭义和广义相对性原理 …………………… 138

2.2 重力场 ……………………………………… 148





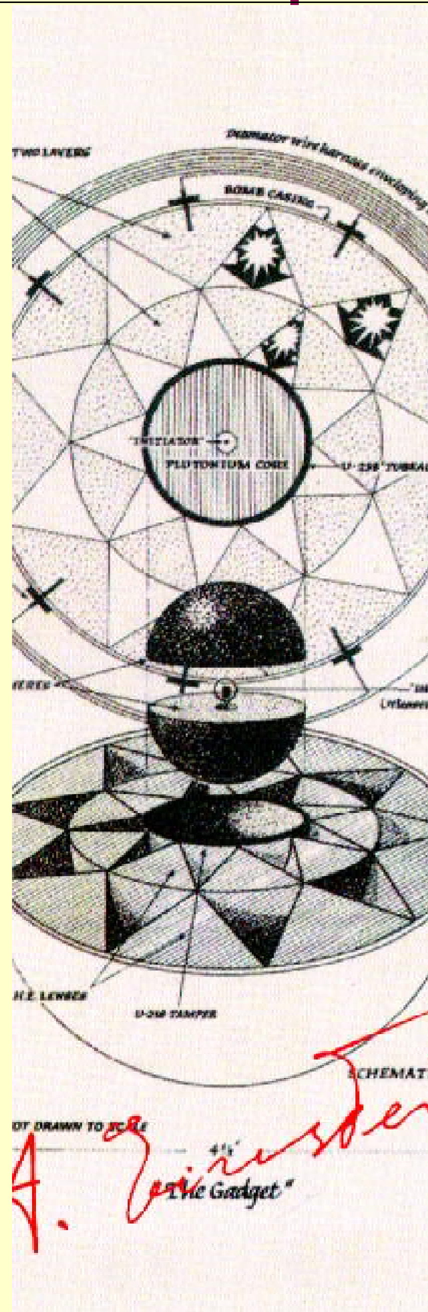
2.3 惯性质量和引力质量相等是广义相对性
公设的论据 ………………………………………… 159
2.4 经典力学和狭义相对论的基础有哪些不能
令人满意的方面 ………………………………… 167
2.5 对广义相对性原理的几个推论 ……………… 172
2.6 在旋转的参考物体上钟和量杆的行为 ……… 183
2.7 欧几里得和非欧几里得连续区域 …………… 191
2.8 高斯坐标 ………………………………………… 197
2.9 狭义相对论的空间—时间连续区可以当做
欧几里得连续区 ……………………………… 204
2.10 广义相对论的空间—时间连续区不是欧几里得
连续区 ……………………………………………… 208
2.11 广义相对性原理的精确表述 ………………… 214
2.12 以广义相对性原理为基础解决
地心引力问题 …………………………………… 220

第三章 对整个宇宙的思考

3.1 在宇宙论中牛顿理论的困难 ………………… 230
3.2 “有限”而“极大”的宇宙的可能 ……… 236
3.3 以广义相对论为依据的空间结构 …………… 241
3.4 对“以广义相对论为依据的空间结构”的
补充 …………………………………………………… 243

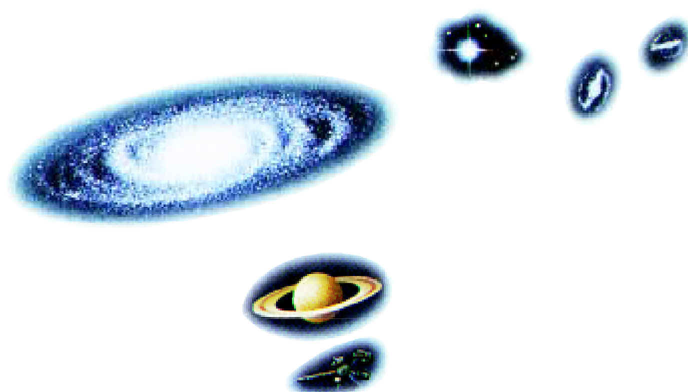
附录

广义相对论的实验证实 ……………………………… 246
相对论与空间问题 …………………………………… 255
爱因斯坦年表 ………………………………………… 272



第一章

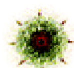
狭义相对论



1.1 几何命题[1]的物理意义

欧几里得几何学的宏伟大厦，是阅读该书的大多数读者在学生时代就很熟悉的，在这建筑的高高的楼梯上，认真的教师逼迫你们花了不知多少时间。对这座宏伟的大厦，你们的敬畏之心或许会多于热爱之心。凭着往昔的经验，如果有人说这门科学中的命题，哪怕是最冷僻的都是不真实的，你们一定会嗤之以鼻。但是，如果有人问，“既然这些命题是真实的，那么你们究竟是如何理解的呢？”或许你们的这种理所当然的骄

[1] 命题：命题是一个非真即假（不可兼）的陈述句。一个命题具有两种可能的取值（又称真值）：为真或为假，且只能取其一。通常用大写字母T 表示真值为真，用F 表示真值为假，有时也可分别用1 和0 表示它们。因为只有两种取值，所以这样的命题逻辑称为二值逻辑。





附:

几何学的历史

“几何”这个词在汉语里是“多少”的意思，但在数学里，“几何”来源于希腊文，原意是土地测量，或叫测地术。

几何学是研究空间和图形性质的一门数学分科。

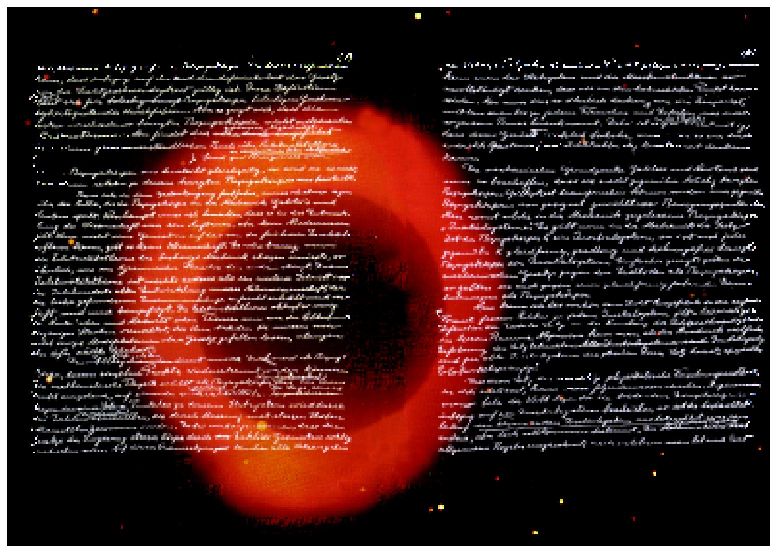
在远古时代，人们在实践中积累了十分丰富的各种平面、直线、方、圆、长、短、宽、窄、厚、薄等概念，这些后来就成了几何学的基本概念。

约公元前1700 年，埃及人阿默斯手抄了一本书，名为《阿默斯手册》，里面载有很多关于面积的测量法以及关于金字塔的几何问题。

在古希腊，数学家如泰勒（约公元前640～

欧几里得　雕塑

欧几里得是希腊划时代最具权威的几何学者，他著的《几何原本》一直是人们研究几何学的基础。欧几里得还进行过许多光学实验，著有《光学》和《论镜》两部光学著作，它们被认为是最早的光学专著。



爱因斯坦手稿　摄影

爱因斯坦是20世纪伟大的科学家，他于1905年发表的《论动体的电动力学》是相对论诞生的标志，这篇文章是20世纪最伟大的论文。爱因斯坦在这篇论文中提出的狭义相对论，在很大程度上解决了19世纪末出现的经典物理学的危机，推动了整个物理学理论的革命。图为爱因斯坦的研究手稿。

前546年)、毕达哥拉斯（约公元前582～前493年)、依卜加（公元前430～？)、柏拉图（公元前427～前347年)、欧几里得（约公元前330～前275年）等人，对几何学都有很大的功绩。

泰勒曾发现若干几何定理和证明的方法，这是理论几何的开端。他能运用几何定理来解决实际问题，凭一根竹竿就可以测得金字塔的高。

毕达哥拉斯认为数学是一切学问的基础。他对几何学有很多研究，著名的勾股定理在西方就叫做“毕达哥拉斯定理”。

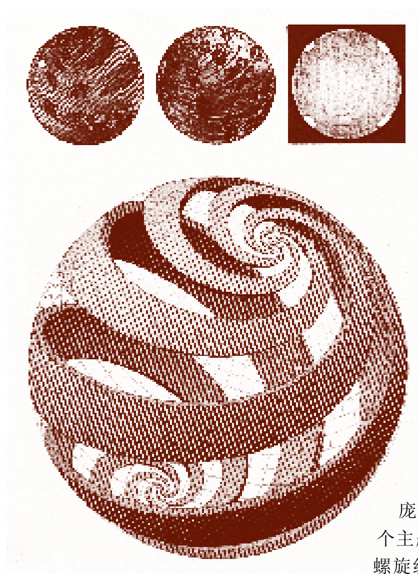
依卜加编著了世界历史上第一部初等几何教科书。他首先使用了“反证法”，与柏拉图同为研究“几何三大问题”(①化圆为方，求作一正方形使其面积等于一已知圆；②三等分任意角；③倍立方，求作一立方体使其体积是一已知立方体的二倍）的有名的人，因而附带发现许多几何定理。



人体比例图　素描　1490年

这是现藏于威尼斯艺术学院的达·芬奇的人体比例图。达·芬奇认为，把完善的人体造型包含在一个圆形和正方形中是最成功的设想，而且人的体长是头长的八倍最为恰当和匀称。

柏拉图首创现在被视为证题利器的“分析法”。而确立缜密的定义和明晰的公理作为几何学的基础，这种思

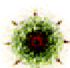


傲态度就会马上消失。现在，让我们来考虑一下这个问题。

“平面”、“点”和“直线”之类的概念引发出了几何学，在大体上我们有确定的观念和几何学的一些简单的命题（公理）相联系，在这些观念的影响下，我们倾向于把简单的命题当做“真理”接受下来。然后以我们认为的合乎逻辑的方法，即用我们不得不认为是正当的逻辑推理过

球面螺旋　埃舍尔　木版画　1958 年

1958 年，埃舍尔遇到加拿大数学家考克斯特，两人成为终身的朋友。埃舍尔从考克斯特的一本书里偶然看到后者为揭示法国数学家庞加莱的双曲几何空间所绘的一个图示，意识到这可以作为他创作的一个主题，此后，他创作了球面螺旋这一作品，表现的都是非欧几里得空间，螺旋纹从中心向四周无限缩小。

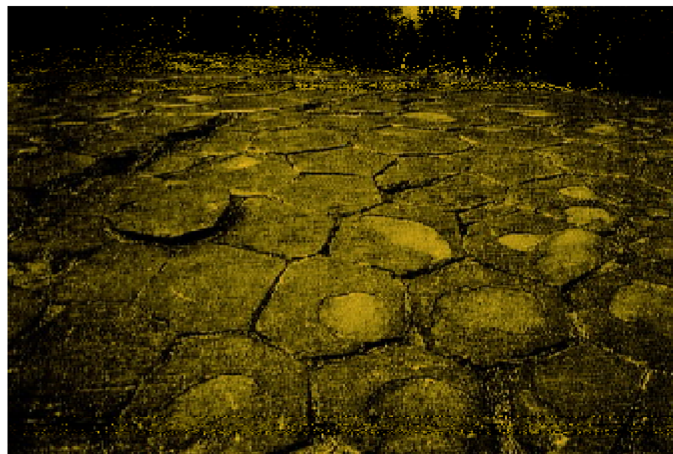


想也由柏拉图开其先河。

真正把几何总结成一门具有比较严密理论的学科的，是希腊数学家欧几里得。

欧几里得（约公元前 330～前 275 年），古希腊数学家。他早年在雅典求学，熟知柏拉图的学说。公元前 300 年左右，受托勒密王（前 364～前 283 年）之邀，到埃及统治下的亚历山大城工作，长期从事教学、研究和著述，涉及数学、天文、光学和音乐等诸领域。著作有《几何原本》、《已知数》、《纠错集》等。

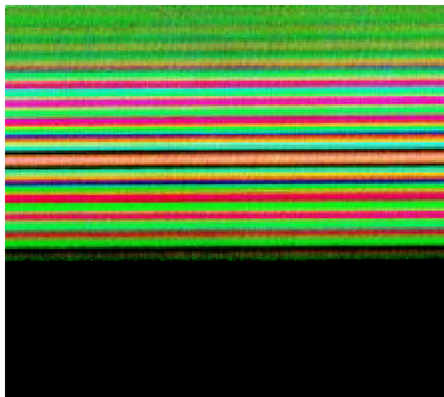
《几何原本》，共分 13 卷，有 5 条公设、5 条公理、119 个定义和 465 个命题，构成了历史上第一个数学公理体系。在书中，欧几里得首先给出了点、线、面、角、垂直、平行等定义，接着给出了关于几何和关于量的 10 条公理，公理后面是



魔鬼的树桩　资料图片

柏拉图重视数学，强调数学在训练智力方面的作用，主张通过几何的学习培养逻辑思维能力，将抽象的逻辑规律体现于几何图形中。图中，玄武岩组成的火山的岩石龟裂图景——一些规则的几何图形。

程，阐明其余的命题是公理的推论，也就是说这些命题已得到证明。于是，只要从公理中推导出的一个命题用的是公认的方法，那么这个命题就是正确的（“真实的”）。这样，各个几何命题是否“真实”就归结为公理是否“真实”。可是上述最后一个问题本身完全就没有意义，而且用几何学的方法无法解答。我们难道要问“过两点只有一条直线”是否真实吗？这当然不能。我们只能说，几何学研究的是称之为“直线”的东西，它说明每一直线唯一确定的性质是由该直线上一个一个的命题及其证明。《几何原本》确立了数学的基本方法学：①建立了公理演绎体系，即用公理、公设和定义的推证方法。②将逻辑证明系统地引入数学中，确立了逻辑学的基本方法。③创造了几何证明的方法：分析法、综合法及归谬法。



连续的波　电脑合成

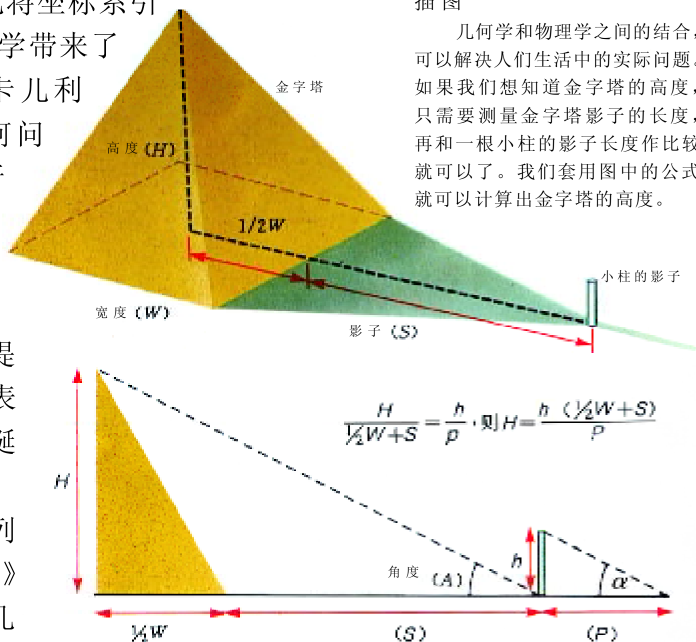
光是连续还是不连续，这个问题在19世纪末期困扰了科学家多年，这个问题也是19世纪末物理学危机中的一个显影。正是在这种物理学的危机蔓延中，才诞生了爱因斯坦的相对论原理。

从《几何原本》发表开始，几何才真正成为了一个有着比较严密的理论系统和科学方法的学科。

17 世纪，笛卡儿将坐标系引入几何学，这给几何学带来了革命性的进步。笛卡儿利用代数方法研究几何问题，从而建立了解析几何。

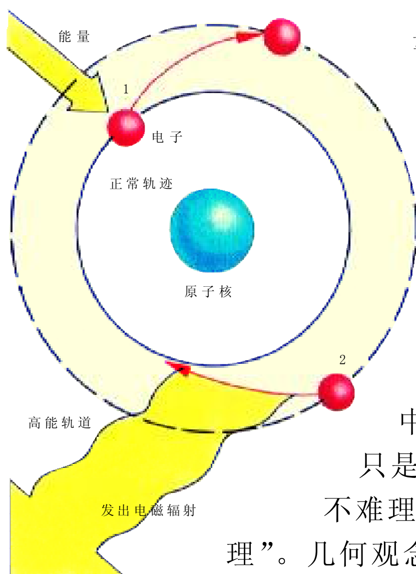
1799 年，法国数学家蒙日发表了《画法几何》一书，提出用多面正投影图表达空间形体。于是诞生了画法几何。

1822 年，彭赛列《论图形的射影性质》一书出版，为射影几



几何学在生活中的运用插图

几何学和物理学之间的结合，可以解决人们生活中的实际问题。如果我们想知道金字塔的高度，只需要测量金字塔影子的长度，再和一根小柱的影子长度作比较就可以了。我们套用图中的公式就可以计算出金字塔的高度。

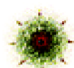


量子跃迁示意图　合成图片

量子的跃迁是指电子由一个量子态过度到另一个量子态。如果量子吸收到能量，就会跃迁到较高的能量轨道上。当此电子回到原来的轨道时，就会以辐射光子的形式释放出相同的能量。

的两点来确定。“真实”这一概念有由该直线上的两点来唯一确定的性质。与纯几何的论点不相符的是，“真实”在习惯上是指与一个“实在的”客体相当的意思；然而无论如何，几何学并不涉及其中所包含的观念与经验客体之间的关系，而只是涉及这些观念本身之间的逻辑联系。

不难理解，我们不得不将这些几何命题称为“真理”。几何观念与自然界中具有正确形状的客体相对应，



何学奠定了基础。

19 世纪初，法国数学家蒙日首先把微积分应用到曲线和曲面的研究中去，并于1807 年出版了《分析在几何学上的应用》一书，这是微分几何最早的一本著作。至此，微积分成了一门独立的数学分支。其后，高斯的《关于曲面的研究》，奠定了曲面论的基础。

高斯的曲面论经过黎曼的拓广，发展成黎曼几何学。

黎曼几何是A．爱因斯坦广义相对论的数学工具。



爱德华·特勒　摄影

在爱因斯坦相对论的指导下，人们开始涉足对原子的利用领域。爱德华·特勒一生最显著的成就就是研制原子弹和氢弹，同时他一直认为发展核武器是十分必要的。

20 世纪初，相对论的出现促进了黎曼几何的进一步发展。20 世纪中期以来，随着数学其他分支（如拓扑学、微分方程和抽象代数）的发展，整体几何已经成为现代几何学的主要内容，在理论物理中有重大的应用。

物理与数学之间的关系

物理学，简称“物理”。“物理”一词的英文physics 出自希腊文φυσικοξ，原意是指“自然”。古时欧洲人称物理学为“自然哲学”。在汉语、日语中，“物理”一词起源于明末清初科学家方以智的百科全书式著作《物理小识》。从最广泛的意义上来说，物理学是研究大自然现象及规律的学问。物理学家们研究存在于不同空间与时间

而具有正确形状的客体无疑是产生那些观念的唯一原因。几何学应制止这一过程，以便使它的结构获得最大的逻辑一致性。例如，在我们的思想习惯中，通过一个可视为固定的物体上的两点来查看“距离”的办法是根深蒂固的。我们在观察三个点位于一条直线时，如果适当地选择观察位置，用一只眼睛观测，使三个点的视位置[2]能够相互重合，我们也认为这三点位于同一直线。

如果依照我们的思考习惯，我们可以在欧几里得几何学中补充如下命题：在一个可视为固定的物体上的两个点永远对应于同一距离（直线间隔），而与该物体的位置发生的任何变化无关，那么，欧几里得几何学的命题就可以归结为关于在所有固定物体的所有相对位置的命题。如此

[2] 视位置：在天文学上，指某一观测时刻相对于真春分点和真赤道的实际看到的天体位置。它是改正经过大气折射后天体的位置。

内的物质的状态，研究物质的结构和运动的一般规律。在现代，物理学已经成为自然科学中最基础的学科之一。物理学理论通常以数学的形式表达出来。经过大量严格的实验验证的物理学规律被称为物理学定律。然而如同其他很多自然科学理论一样，有些定律不能被证明，其正确性只能通过反复的实验来检验。

数学是人类文化最基本的元素之一。它的语言构成了人类文化的有机体。

数学研究的是显示世界的空间形式和数量关系，包括算术、代数、几何、三角、微积分等。其特点是，高度的符号化、抽象化、形式化、逻辑化、简单化。数学更接近于逻辑或者哲学，根据几



立体空间分割
埃舍尔　石版画　1952 年

这幅作品唯一的目的就是表现在二维纸面上无限延伸的空间。它并不像数学课本里所画的那些规则的空间结构，它是按照透视法则画出来的，这些看似彼此平行的线条其实会在遥远的地方汇聚在六个点，因为它的三维结构，因此会汇集在六个点。

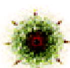


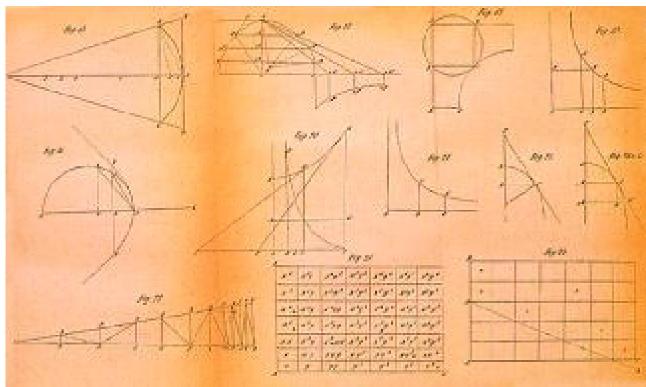
一来，几何学就可以看做是物理学的一个分支。现在，几何命题是否是“真理”的问题，我们能够提出合理的解释。我们有理由问，对于与几何观念相联系的那些真实的东西，这些命题是否已被满足。用精确的术语来表达，也可以这样说：我们把具有此种意义的几何命题的“真实性”理解为该几何命题对于用圆规和直尺作图的有效性。

当然，以此断定几何命题的“真实性”，其基础是不大完整的经验。但我们目前暂且认定这种“真实性”。然后在后一阶段将会看到，这种“真实性”是有限的，那时再来讨论这种有限性的范围。

费马　素描　17 世纪

费马是法国数学家和物理学家。早年主要研究概率论，对于数论和解析几何也有深入研究，在其所著的《平面及空间位置理论的导言》中，最早提出了一次方程代表直线，二次方程代表截线，对一次和二次方程的一般形式也进行了研究。





莱布尼兹手稿　插图

宇宙间存在着基本的秩序与和谐性，用数学来描述宇宙的秩序这种思想可溯源到古希腊。这一点为莱布尼兹所深知，他仔细思考过这种思想，他提出了最小作用量原理，并且相信：能够发现寓于宇宙的每一现象之中的极大或极小原则。图为莱布尼兹论述这些观念的手稿。

个基本公理可以建立起一个逻辑体系。

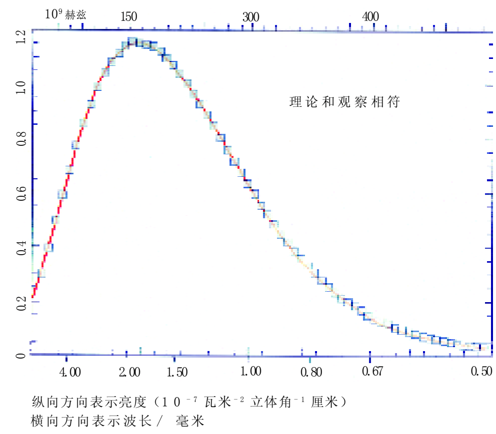
数学是自然科学之母。伽利略说过，“一个理论物理学家是某种程度的数学家”。为了方便理解，物理学从数学中寻找工具。数学为物理学提供了一种准确的语言来进行描述，比如欧氏几何与牛顿的平直时空观和非欧几何与爱因斯坦的弯曲时空观。另外，数学还为物理学提供了一个逻辑体系，以便进行分析与推导，比如在平直时空观下物体应该怎么运动，怎么相互作用，而在弯曲时空下又是如何。

数学为物理学带来了巨大的成功，但不能认为没有数学就没有物理学（法拉第是最好的例子，他的数学很差，他的成就取决于他对物理学的理解）。经典物理学的确立直接导致了微积分的诞生，而量子力学又为数论打破了瓶颈。物理学同时又导致数学的进步。

作为基础学科，数学与物理学二者是相辅相成，缺一不可的。

1.2 坐标系

根据对距离的物理解释，我们能够用测量[1]法确立一固体上两点间的距离。为达到这个目的，我们用“距离”（杆 S ）作为标准



微波背景谱的测量　示意图

宇宙微波背景谱，是典型的热体辐射谱。为了使辐射处于热平衡状态，物质必须将它多次散射。

[1] 测量：一般指用仪表测定各种物理量的工作。在机械制造中，常指用量具或仪器来测定零件（或装配在一起的部件和机器）的尺寸、角度、几何形状或表面相互位置等一系列工作的总称。

附：

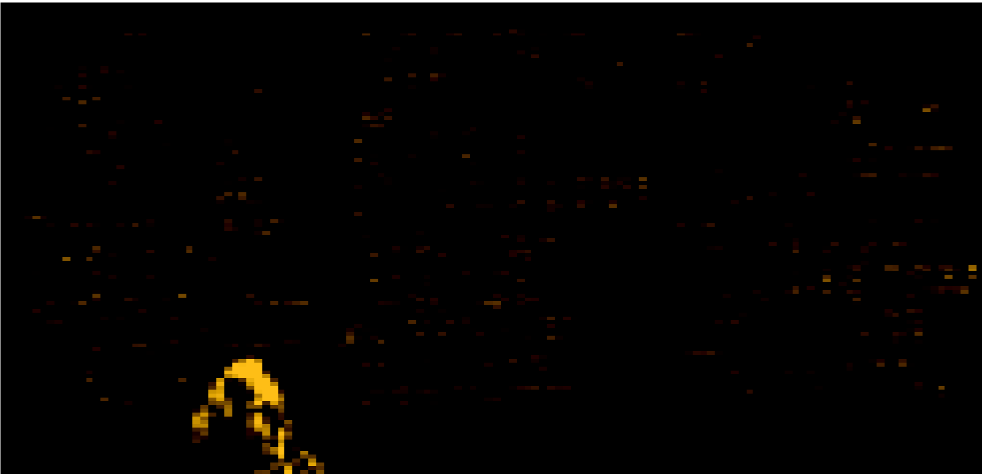
坐标系的历史

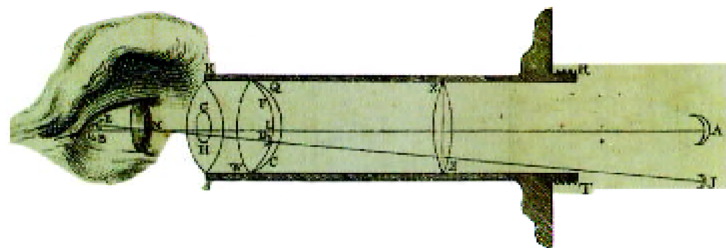
坐标系的定义，有数学与物理学两种。

数学上的定义为：坐标系是使某个数学对象的集合中的元素对应于数量的结构。它用以确定数或数组与基本几何对象（常常是点）之间对

上帝的想法　合成图片

爱因斯坦的相对论理论是人类最完美的智慧结晶，它将牛顿静止的宇宙论转化为充满动感的宇宙理论。相对论是当今最能解释宇宙的理论，它揭示了上帝创造世界的想法。



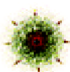


望远镜　合成图片

广义上的望远镜不仅仅包括工作在可见光波段的光学望远镜，还包括射电、红外、紫外、x 射线，甚至 γ 线望远镜。从 1609 年，伽利略制造出第一架望远镜，至今已有近 400 年的历史，其间经历了重大的飞跃。

量度。如果 A 和 B 是一固体上的两点，按照几何学的规则，我们可以作一直线连接两点，然后以 A 为起点，直到到达 B 点为止，其间多次反复记取从 A 点到 B 点间的测量距离 S。所需记取的 S 的次数相加就是 AB 距离的数值量度，这是一切长度测量的基础。

不仅在科学方面，而且对于日常生活来说，描述一切事件发生的地点或任一物体在空间中的位置的基础，都是参考在一固定物体上确定该



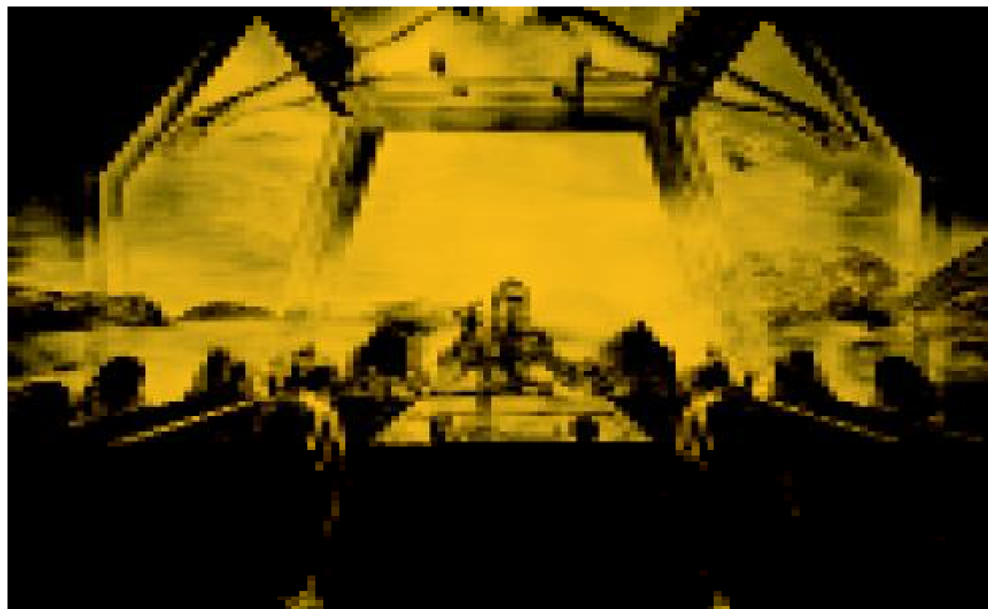
最后的晚餐　达利　油画　1955 年

20 世纪 30 年代达利发现了特别适合于他的超现实主义的新几何，虽然他的超现实主义的理论在很大程度上基于弗洛伊德的潜意识分析，但是高维空间对他的理论也有启发，他把时空第四维空间与潜意识的更高维结合起来。在这里《最后的晚餐》发生在象征整个宇宙的十二面体中。

应关系的参考系。最早用于数与形的结合，后来发展为一种数学结构。

物理学上的定义为：为了确定描述物体（或物体系）的位置和运动，根据问题需要而任意选择的独立变数，其组合结构称为坐标系。

公元前 4 世纪，我国战国时代天文学家石申曾利用坐标方法绘制恒星方位表。



事件或该物体的相重合点为根据的。比如“纽约时代广场”在空间中的位置。地球是能够参照的固体，“泰晤士广场”是地球上已明确规定的一点，现在所考虑的则是在空间上与“泰晤士广场”相重合的点。

这种标记位置的原始方法有两个限制：其一，它只适用于固体表面上的位置；其二，当固体表面不存在能够相互区分的点时，该方法便不适用。但在不改变位置标志的本质时，这两种限制是能摆脱



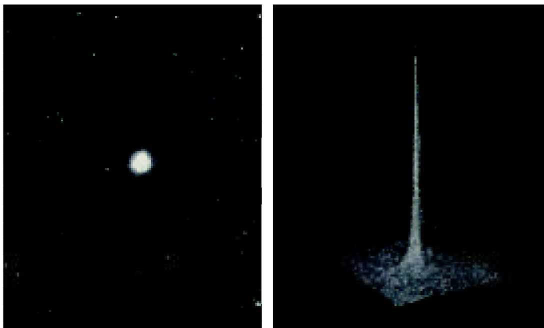
笛卡儿　油画

笛卡儿，法国数学家、科学家和哲学家。他是西方近代资产阶级哲学奠基人之一。他的哲学与数学思想对历史的影响是深远的。笛卡儿不仅在哲学领域里开辟了一条新路，同时笛卡儿又是一个勇于探索的科学家，在物理学、生理学等领域都有值得称道的创见，特别是数学上他创立了解析几何，从而打开了近代数学的大门，在科学史上具有划时代的意义。

古希腊数学家阿波罗尼奥斯著的《平面轨迹》中，曾用类似于现在直角坐标系的轴线来研究圆锥曲线。

17世纪，法国数学家费马和笛卡儿建立了坐标几何学。

费马用一种没有负数的倾斜坐标描绘曲线，由方程中的两个未知量得出轨迹图形。他还指出联系两个未知量的方程，如果是一次的代表直线轨迹，如果是二次的就代表圆锥曲线。



光束衍射示意图

光束衍射发散后投射到屏幕上，此图表示这一效应造成的实际星象。

笛卡儿则从建立一种使算术、代数和几何统一起来的普遍数学的愿望出发，指出平面上的点与实数的对应关系，并考虑二元方程$F(x,y)=0$，当x变化时，y值也跟着改变，x，y的不同数值构成平面上的一条曲线。实际上他只建立了坐标横轴（x轴），到1750年瑞士数学家克莱姆才正式引入坐标纵轴（y轴）。

于是几何的问题便成为代数的问题。

这样的发展不但使几何问题的处理容易些，更有其重大的意义：

首先，解析之后，使可研究的图形的范围扩大，除了直线的一次方程式，或者圆周的二次方程式，我们还可以取任意的方程式$F(x,y)=0$，

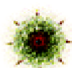
的。例如有一朵白云飘浮在时代广场上空，我们可以在广场上垂直竖起一根长竿直抵白云，以此来确定白云相对于地球表面的位置，用标准量杆测量长竿的长度，结合长竿的位置标记，就能获得这朵白云的完整的位置标记。通过上述例子，我们能够看出关于位置的概念是如何改进发展的。

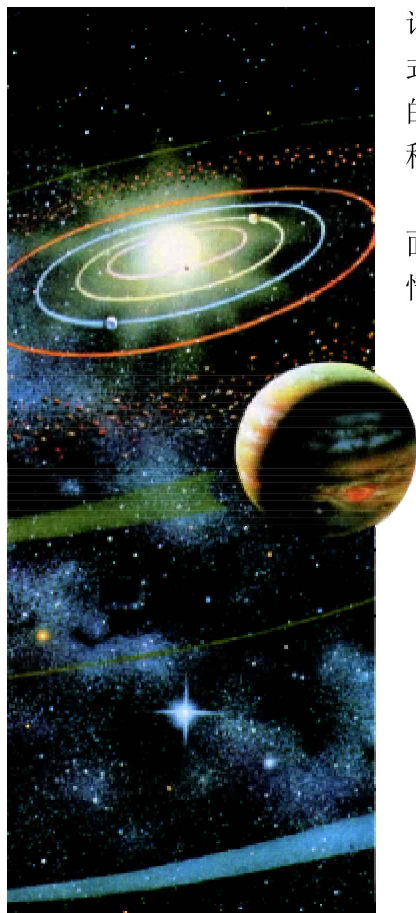
（a） 我们设想将确定位置所参照的固体加以补充，补充后的固体延伸到我们需要确定其位置的物体。

（b） 在确定物体的位置时，我们使用量杆量出来的长竿长度，而非选定的参考点。

（c） 即使未曾把直抵云端的长竿竖立起来，根据光学方法对云朵进行观测及考虑到光的传播特性，我们同样可以讲出白云的高度，并且能够确定升上云端的长竿的长度。

通过以上论述，我们看到了有利的一面，即如何在描述位置时，依



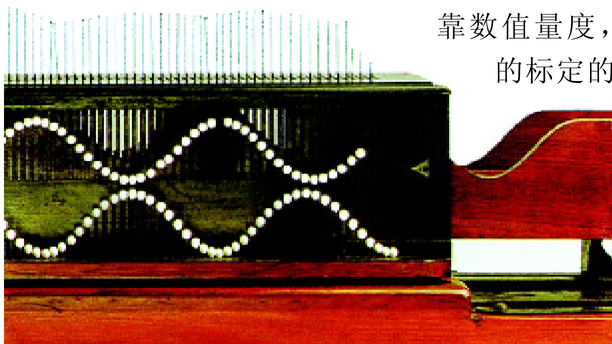


讨论它的所有点坐标（x，y）适合这样方程式的轨迹。因此许多用几何的方法很难处理的曲线，在解析化之后，都可从表示它的方程式中得到有关的几何性质。

其次，研究的图形不再局限在二维的平面上，可推广至高维的空间。世界上的事情，如果只用二维的平面，往往不足以表示，需要取更多的坐标。例如我们所在的空间是三维，有x、y、z三个度量。假使要用几何来表示物理的问题，那么三个度量之外，尚须加一个时间t，所以物理的空间就变成了四维的空间。不但如此，假使有一点在三维空间运动，那么除了需要（x，y，z）来表示点的位置，还需要用这三坐标对时间的微分来表示它的速率，这就成了六维空间。所以种种的情形

行星　合成图片

人类经过千百年的探索，到16世纪哥白尼建立日心说后才普遍认识到：地球是绕太阳公转的行星之一，而包括地球在内的八大行星则构成了一个围绕太阳旋转的行星系——太阳系的主要成员。行星本身一般不发光，以表面反射太阳光而发亮。在主要由恒星组成的天空背景上，行星有明显的相对移动。



光传播研究模型　摄影

麦克斯韦一生都在寻求解释光传播的力学原理，尤其是借助齿轮与传动系统等模型。这个模型是他的一位学生惠斯顿建造的。

靠数值量度，而不是固定参考物上存在的标定的位置，那就会比较方便。在物理测量中应用笛卡儿坐标系能达到此目的。

这个坐标系由三个与一固体牢固地连接起来的相互垂直的平面组成。在一个坐标系中，任何事件发生的地点（主要部分）由事件发生点向该三个平面所作垂线的长度或坐标（x，y，z）来确定，这三条垂线的长度可以按几何学确立的规则和方法，用刚性测量杆经过一系列操作来确定。

都指向我们有必要考虑更高维的空间来表示自然的现象。

解析几何把几何研究的范围大大地扩大了，而科学发展的基本现象，就是要扩大研究的范围，了解更多的情形。笛卡儿的解析几何，便达到了这个目的，使几何学迈入一个新的阶段。

莱布尼兹于1692年创用了“坐标”一词，他还于1694年使用了“纵坐标”。“横坐标”则由德国数学家沃尔夫等人于18世纪引入。

“坐标”的现代意义

《现代汉语词典》里，“坐标”的解释是：“能够确定一个点在空间的位置的一个或一组数，叫做这个点的坐标。通常由这个点到垂直相交的若干条固定的直线的距离来表示。这些直线叫做坐标轴。坐标轴的数目在平面里为2，在空间里为3。”

《辞海》（1999年版）说，“坐标”是“确定平面上或空间中一点位置的一组有序数”。同时，它对坐标的制作方法、特点作了具体说明，并简要介绍了坐标的种类：除了直角坐标，常用的还有极坐标、球面坐标、柱坐标等。

测微计　摄影

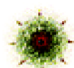
测微计是用来做非常精确的测量的工具，例如度量高精密度金属管的直径。这个测量工具在科学日益发展的今天，用处颇大。

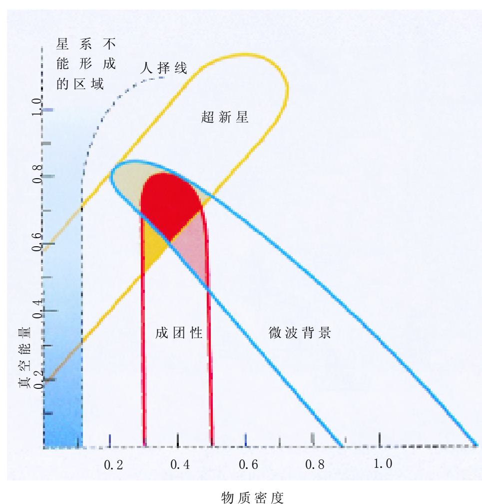


从习惯来看，构成坐标系的刚性平面一般是不大用的；此外，坐标的构成不是由刚杆结构确定，而是用间接法确定的。如果物理学和天文学要保持其清楚明确的结果，就必须以上述考虑来寻求位置标示的物理意义。

我们因而得到下面的结果：在空间中，对事件位置的每一种描述都必须围绕所参照的刚体展开。所得出的结果将认为欧几里得几何学的定理适用于“距离”为有效；而一刚体[2]上的两个标记是“距离”在物理上的习惯表示。

[2] 刚体：在外力作用下各部分体积和形态都不会发生变化的物体。刚体是力学中的一个科学抽象概念。实际物体都不是真正的刚体，但在很多场合，物体大小和形状的变化对整个运动过程影响很小，把它看做刚体可使问题大为简化。





真空能量和物质密度　合成图片

图中水平方向表示物质密度，而垂直方向表示真空能量，点线显示智慧生命能够发展的区域边缘。在这幅图中分别标出对应于超新星、物质成团和微波背景的观测的区域，从图可以看出这三个区域有一个共同的交集。如果物质密度和真空能量处于这个交集，它就意味着暴胀可能是自然的一个定律。

时间是最好的催化剂。现在，“坐标”一词也逐渐走出数学、物理学的书斋和实验室，走进了人们的日常生活的方方面面，同时也就衍生出了很多现代“坐标”概念：

为了展示某城市或乡村的建筑、文化的水准和品位，于是就有了城市坐标、乡村坐标等；

为了宣扬、提倡某种精神或者道德风尚，产生了人物坐标、人生坐标、心灵坐标、灵魂坐标等；

为了表明某种产品、某种风格的流行、时尚程度，就有了时尚坐标、魅力坐标等；

为了提倡某种生活的标准或方向，于是就有了健康坐标、幸运坐标、生活坐标等等。

当然，不管怎么发展，现代“坐标”仍然没有改变其原始的“标准、尺度、方向”之义。

1.3 经典力学中的空间和时间

描述物体在空间中的位置如何随“时间”而改变是力学的目的。假如未经认真思考，以语焉不详的言词来解释力学的目的，那么，违背力求清楚明确的神圣精



星体的运动　合成图片

星体在空间的运动是特指它与其他物体的相对位置改变了，如果我们从不同的两个位置来观察同一星体的运动，我们会发现这一星体有着不同的运动方式。

附：

经典力学的定义

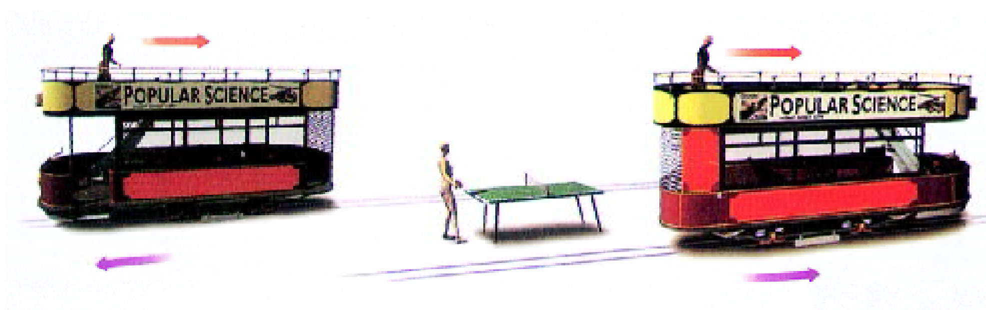
经典力学，又称古典力学，是力学的一种。它以三大牛顿运动定律为基础，在宏观世界和低速状态下研究物体运动规律，所以又称牛顿力学。“宏观”是相对于原子等微观粒子而言的，“低速”是相对于光速而言的。

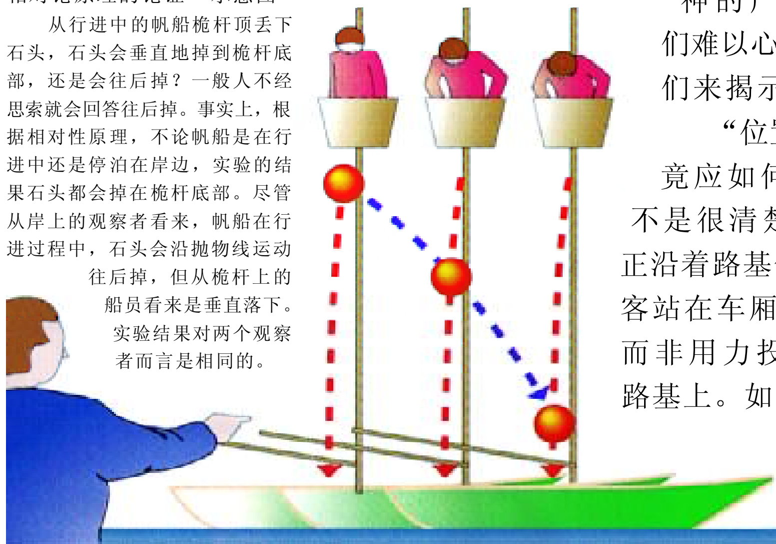
机械运动是物质运动的最基本的形式。机械运动亦即力学运动，是物质在时间、空间中的位置变化，包括移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等。而平衡或静止，则是其中的特殊情况。物质运动的其他形式还有热运动、电磁运动、原子及其内部的运动和化学运动等。

力是物质间的一种相互作用，机械运动状态的变化是由这种相互作用引起的。静止和

相对移动　合成图片

运动是个多义词，物理学里讲的运动是指物体位置的变化。如人们骑自行车时，人和自行车对地面或路旁的树都有位置的变化；人们乘坐汽车的时候，相对于地面有位置的变化。物理学里把物体位置的变化叫机械运动。



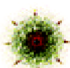


相对论原理的论证　示意图

从行进中的帆船桅杆顶丢下石头，石头会垂直地掉到桅杆底部，还是会往后掉？一般人不经思索就会回答往后掉。事实上，根据相对性原理，不论帆船是在行进中还是停泊在岸边，实验的结果石头都会掉在桅杆底部。尽管从岸上的观察者看来，帆船在行进过程中，石头会沿抛物线运动往后掉，但从桅杆上的船员看来是垂直落下。实验结果对两个观察者而言是相同的。

神的严重过失将使我们难以心安。现在，让我们来揭示这些过失。

“位置”和“空间”究竟应如何理解呢？这里不是很清楚。设一列火车正沿着路基匀速行驶，一乘客站在车厢窗口松手丢下，而非用力投掷一块石头到路基上。如果撇开空气阻力影响不谈，车厢窗口的乘客看见石头



运动状态不变，则意味着各作用力在某种意义上的平衡。因此，力学可以说是力和(机械)运动的科学。

经典力学简史

力学是物理学中发展最早的一个分支，它和人类的生活与生产息息相关。

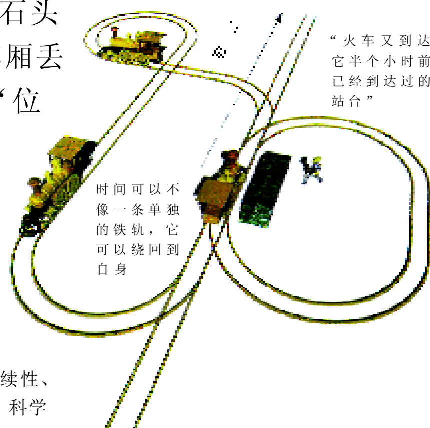
在遥远的古代，人们就在生产劳动中应用了杠杆、螺旋、滑轮、斜面等简单机械，从而促进了静力学的发展。

古希腊时代，就已形成比重和重心的概念，出现杠杆原理。阿基米德（约公元前287～212年）的浮力原理提出于公元前200多年。虽然这些知识尚属力学科学的萌芽，但在力学发展史中应有一定的地位。

16世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展。钟表工业促进了匀速运动的理论，水磨机械促进了摩擦和齿轮传动的研究，火炮的运用推动了抛射体的研究。天体运行的规律提供了机械运动最单纯、最直接、最精确的数据资料，使得人们有可能排除摩擦和空气阻力的干扰，得到规律运动的认识。天文学的发展为力学找到了一个最理想的“实验室”——天体。

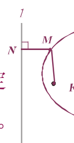
天文学的发展与航海事业关系密切。十六七世纪，资本主义生产方式开始兴起，海外贸易和对外扩张刺激了航海的发展，这才提出对天文作系统观测的迫切要求。第谷（1546～1601年）顺应了这一要求，以毕生精力收集了大量观测数据，为克卜勒（1571～1630年）的研究作了准

沿直线落下，而人行道上的行人则看到石头沿抛物线[1]落下。现在有一问题，从车厢丢下的做匀速运动的石子所经过的各个“位置”是“的确”在一条直线上，还是在一条抛物线上呢？另外，“在空间中”的运动在此究竟是什么意思呢？根据“坐标系”中的论述，答案将不言自明。



时间的轨迹　合成图片

时间和空间是物质固有的存在形式。时间是物质运动的延续性、间断性和顺序性，其特点是一维性，即不可逆性。在这幅图中，科学家用火车的运行轨道来说明时间的发展轨迹。

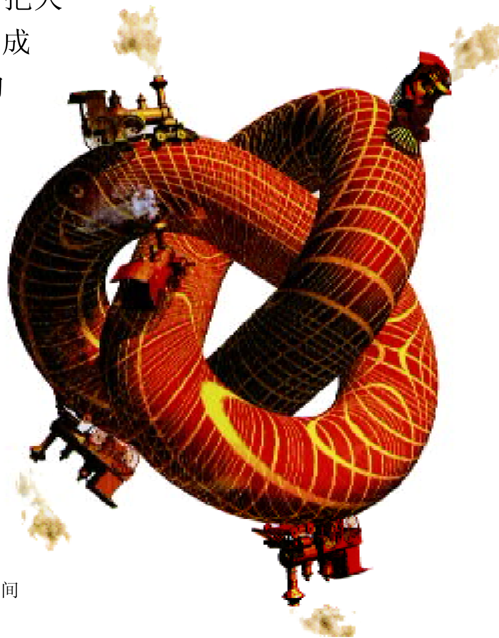


[1] 抛物线：平面内与一个定点 F 和一条定直线 l 的距离相等的点的轨迹叫做抛物线。定点 F 叫做抛物线的焦点。定直线 l 叫做抛物线的准线。即 $\frac{MF}{MN}=1$，则点 M 的轨迹是抛物线。

备。克卜勒于1609年和1619年先后提出了行星运动的三条规律，即克卜勒三大行星运动定律。

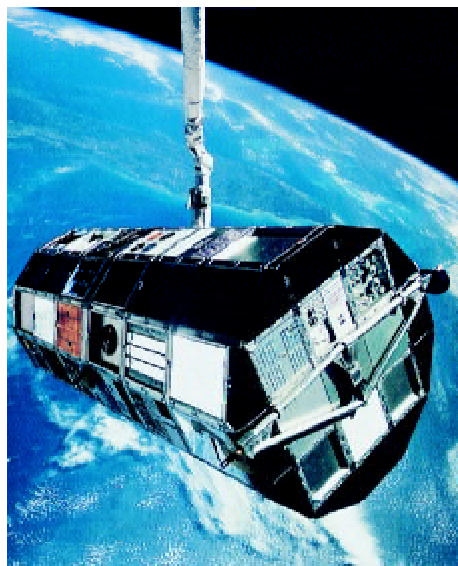
与此同时，以伽利略（1564～1642年）为代表的物理学家对力学开展了广泛研究，得到了自由落体定律。伽利略的两部著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》(1632年)和《关于力学和运动两种新科学的谈话》(1638年)(简称《两门新科学》)，为力学的发展奠定了思想基础。

随后，牛顿（1642～1727年）把天体的运动规律和地面上的实验研究成果加以综合，进一步得出了力学的基本规律，建立了牛顿三大运动定律和万有引力定律。牛顿建立的力学体系经过伯努利（1700～1782年）、拉格朗日（1736～1813年）、达朗贝尔（1717～1783年）等人的推广和完善，形成了系统的理论，取得了广泛的应用并发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支。



时间和空间的形态　合成图片

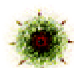
在牛顿的理论中，时间独立于其他万物而存在，时间的存在形态仿佛是在两个方向上都无限延伸的铁轨。



首先，“空间”一词非常模糊，我们丝毫无法构成概念，因此我们以“相对于实际上可看做刚性的一个参考物体的运动”这句话代之。火车车厢或铁路路基是参考物体，“坐标系”是有利于数学描述的观念，如果引入“坐标系”来代替“参考物体”，对石块位置的描述我们就可以说：石块相对于与

通讯卫星　合成图片

环绕地球在空间轨道上运行的无人航天器，人造卫星是发射数量最多、用途最广、发展最快的航天器。完整的卫星工程系统通常由人造卫星、运载器、航天器发射场、航天控制和数据采集网以及用户台组成。人造卫星和用户台组成卫星应用系统，如卫星通信系统、卫星导航系统和卫星空间探测系统等。



到了18世纪，经典力学已经相当成熟，成了自然科学中的主导和领先学科。

伽利略和牛顿对物理学的功绩，就是把科学思维和实验研究正确地结合在一起，从而为力学的发展开辟了一条正确的道路。



时间和空间

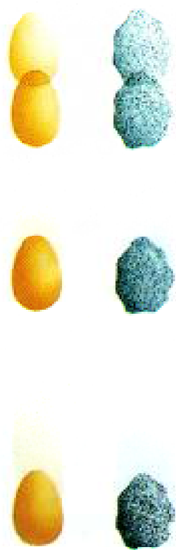
时间和空间是物质固有的存在形式。时间是物质运动的延续性、间断性和顺序性，其特点是一维性，即不可逆性；空间是物质的广延性和伸张性，是一切物质系统中各个要素的共存和相互作用的标志。时间、空间与运动着的物质不可分离。

我们关于时间和空间的概念来自于伽利略和牛顿。在他们之前，亚里士多德说：“物体的自然状态是静止的，并且只在受到力或者冲击作用时才运动。这样，重的物体比轻的物体下落得更快，因为它受到更大的力将它拉向地球。”他还说，人们纯粹思维可以找到制约宇宙的定律，而不须用观测去检验。

伽利略不相信亚里士多德的说法。据说，他在比

牛顿　雕塑

牛顿，是英国伟大的数学家、物理学家、天文学家和自然哲学家。他在科学上最卓越的贡献是微积分和经典力学的创建。这是竖立于剑桥三一学院的牛顿的雕像。



下落　合成图片

一块沉重的岩石比同体积的鸡蛋重得多，但是当它们落下的时候，速度完全是一样的，而且同时到达地面。这说明物体下落的速度与它的质量无关。这个定理是由意大利科学家伽利略首先发现的。

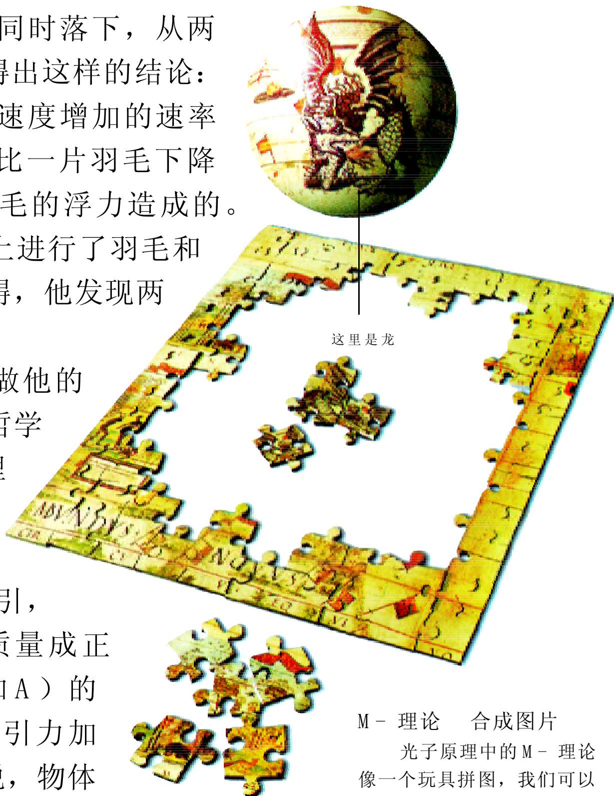
车厢连接在一起的坐标系走过的是一条直线，但相对于与路基连接在一起的坐标系是一条抛物线。借助此例，我们清楚地知道独立存在的轨线不会存在，存在的是相对于特定参考物体的轨线。

为了完整地描述运动，物体的位置如何随时间的改变而改变是必须要说明的。这也是对物体在何时位于轨线上的每一点的一个说明。为了能更好地阐述，我们必须补充一个关于时间的定义，借助这个定义，时间值在本质上可以看做是可观测的量，即测量的结果。根据经典力学观点，我们设想有两个构造完全相同的钟，在车

萨斜塔上让大、小两个铁球同时落下，从两个铁球同时着地这个结果，得出这样的结论：不管物体的质量是多少，其速度增加的速率是一样的。当然，一个铅球比一片羽毛下降得更快，那是由于空气对羽毛的浮力造成的。航天员大卫·斯高特在月球上进行了羽毛和铅球实验，因为没有空气阻碍，他发现两者同时落到地面。

伽利略的测量被牛顿当做他的运动定律的基础。在《自然哲学的数学原理》中，牛顿以公理的形式提出了运动三定律，同时还发现了万有引力定律：任何两个物体都相互吸引，其引力大小与每个物体的质量成正比。如果其中一个物体（例如A）的质量加倍，则两个物体间的引力加倍。在这个定律中，牛顿还说，物体之间的距离越远，则引力越小。这个定律精确地预言了地球、月球和其他行星的轨道。

在这个理论框架中，牛顿以注释的方式阐明了他



M－理论　合成图片

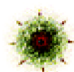
光子原理中的M－理论像一个玩具拼图，我们可以很容易辨认围绕着拼图边缘的小片并将其嵌在一起，但是我们对在中央会发生什么了解很少，在那里我们不能作某些量是很小的近似。



佛罗伦萨的日常生活　油画

1610年伽利略生活在佛罗伦萨，但是伽利略没有预料到他会在这里经历梦魇般的生活：审判。现在，佛罗伦萨城外的阿切特里的山岗上，伽利略故居开放供游客参观。这幅画就描绘了这里的景色。

厢窗口的乘客拿着其中一个，人行道上的观察者拿着另一个，当每一滴嗒声响起时，两个观察者随聆听到的声响来确定石块相对于他们各自参考物所处的位置。至于因光的传播速度的有限性而造成的不准确性，我们在此没有计入。我们将在以后详细讨论这点，以及该处的另一主要困难。



对时间、空间和运动的观点：

时间——“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着，它又可称为‘期间’，相对的、表观的和通常的时间，是期间的一种可感觉的、外部的或者精确的，或者是变化着的量度，人们通常就用这种量度，如小时、日、月、年来表示真正的时间。”

空间——“绝对空间，就其本性而言，它与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。相对空间是绝对空间的某一可动部分或其量度，它通过对其他物体的位置的存在而为我们的感觉所指示出来，并且通常把它们当做不动空间。”

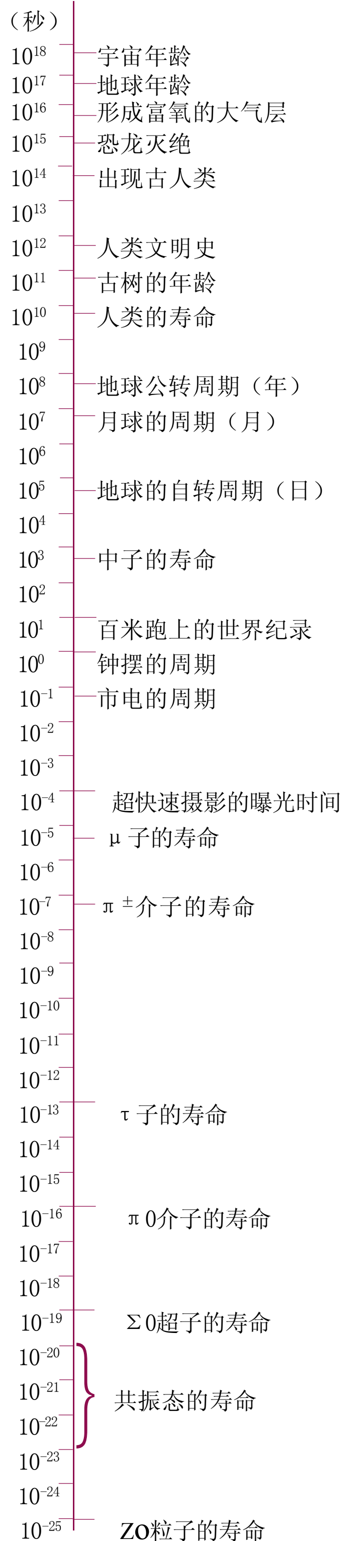
运动——“绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对处所的移动。”



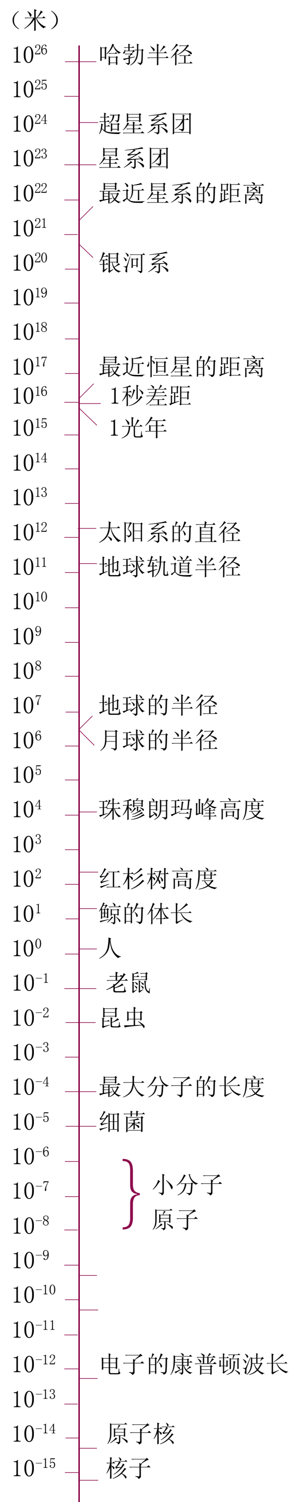
测量　摄影

文艺复兴让几何与艺术实现了有机的结合，特别是透视法的使用使他们对制作观测仪越来越感兴趣。1525年，丢勒《测量论》的出版，详细地论述了关于立体图形的正面图和正视图，这些研究为以后建筑和工程项目提供了很大的帮助。图为文艺复兴时期的人们在测量地基。

物质世界的时标



物质世界的空间尺度

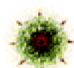




1.4 伽利略坐标

众所周知，伽利略—牛顿力学的基本定律，即惯性定律的表述如下：一个自由质点[1]永远以恒定的速度运动，或者说，一质点在离其他物足够远时，一直保持静止状态或匀速直线运动状态。惯性定律谈到了物体的运动，并且指出了可在力学描述中加以应用的，且不违反力学原理

[1] 质点：当物体的形状和大小在所研究的问题中可以忽略时，把这个物体看成一个具有质量的几何点，这样的研究对象在力学中叫做质点。实际上，物体都是有大小和形状的，但当物体的大小和形状与所研究的问题或者无关或者关系很小，就可以把物体当做一个“质点”来处理。当一个物体只做平动时，其内部各处的运动情况都相同，物体的运动状态就可以用一个点的运动状态来代替，因此可将这物体看成一个质点。质点是个抽象的科学概念，它是人们为了科学研究的需要而引入的一个理想模型，其目的是为了突出研究问题的主要矛盾。



附：

惯性定律和伽利略

惯性定律即牛顿第一定律，它的发现者并不是牛顿而是伽利略。

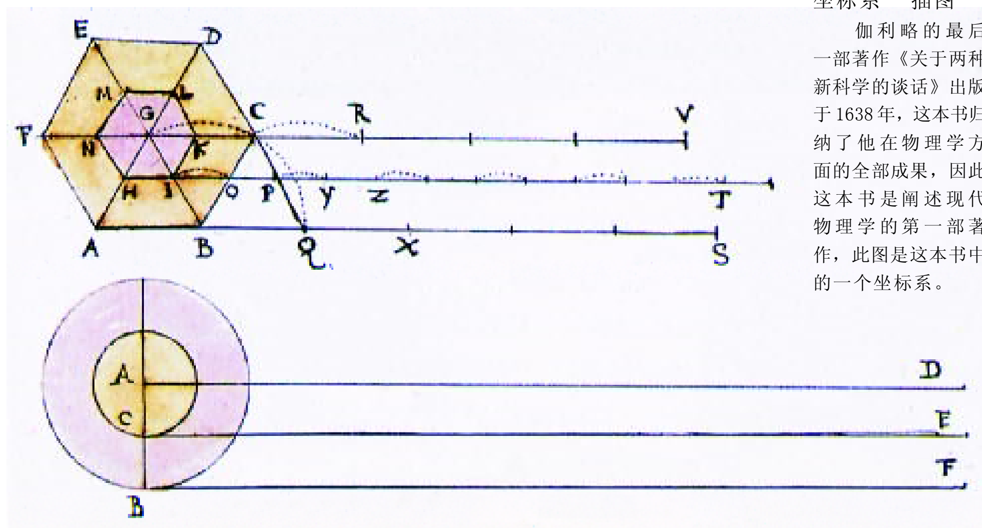
2 000年以前，人们已经提出了运动和力的关系问题。亚里士多德从对一些运动的观察中得出结论：必须有一个恒定的力作用在物体上，物体才能够以恒定的速度运动，没有力的作用，物体就静止下来。在他看来，力就是物体运动的原因。在此之后很长一段时间内，人们对运动和力的关系的认识一直徘徊不前。

17世纪，伽利略大胆断言：一个物体具有某一速度，只要没有加速或减速的原因，这个速度将保持不变。也就是说，当没有外力作用于物体时，物体将保持静止或做匀速直线运动。在伽利略



伽利略　佚名　油画　17世纪

伽利略是伟大的意大利物理学家和天文学家，科学革命的先驱。历史上他首先在科学实验的基础上融会贯通了数学、物理学和天文学三门知识，扩大、加深并改变了人类对物质运动和宇宙的认识。为了证实和传播N. 哥白尼的日心说，伽利略献出了毕生精力。



坐标系　插图

伽利略的最后一部著作《关于两种新科学的谈话》出版于1638年，这本书归纳了他在物理学方面的全部成果，因此这本书是阐述现代物理学的第一部著作，此图是这本书中的一个坐标系。

看来，力并不是物体运动的原因，而是运动状态发生变化的原因。

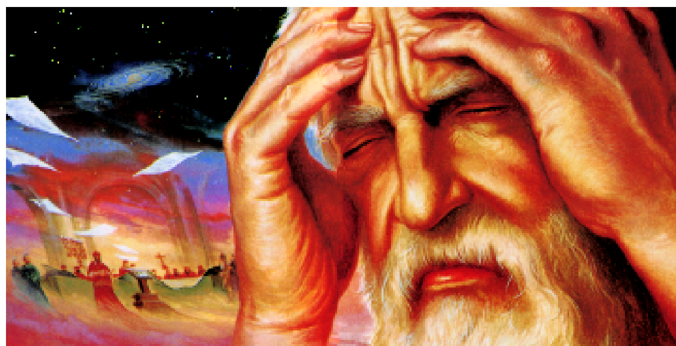
伽利略着重研究了物体在斜面上的运动。他注意到物体沿斜面向下运动时，速度不断增加，沿斜面向上运动时，速度不断减小。根据这一事实，伽利略这样认为，在没有倾斜的水平面上，物体的运动应当是没有加速也没有减速，也就是说速度应当是不变的。当然，伽利略知道，这种水平运动的速度实际上并不是不变的，而是逐渐减小的，这是因为物体受到了摩擦力阻碍的缘故。摩擦力越小，物体以接近于恒定速度运动的时间就越长，在没有摩擦的理想情况下，物体将以恒定的速度持续运动。

现在，惯性定律可以用实验设备近似地得到证明：把物体放在一个导轨上，并使物体和导轨之间形成气层，和气垫船的道理一样，物体沿导轨运动时摩擦可以减到很小，这时推动一下物体，可以使得物体的运动很接近匀速直线运动。当然，惯性定律的正确性主要还在于它所推出的结论都与实验结果相符。伽利略的观点后来由牛顿总结为运动第一定律，所以说牛顿第一定律就是伽利略最早发现的惯性定律。



托勒密的宇宙体系　合成图片

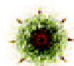
在长达几千年的历史里，人们一直相信地球是宇宙的中心，太阳和行星都是围绕地球旋转的。公元前2 世纪，希腊著名的科学家托勒密在其著作中阐述了这种宇宙体系。



遭受迫害的伽利略
素描　17 世纪

伽利略在人类思想解放和文明发展的过程中做出了划时代的贡献。在当时的社会条件下，为争取不受权势和旧传统压制的学术自由，为近代科学的生长，他进行了坚持不懈地斗争，并向全世界发出了振聋发聩的声音。因此，他是科学革命的先驱，也可以说是“近代科学之父”。这幅图描绘了伽利略遭受教会迫害时的形象。

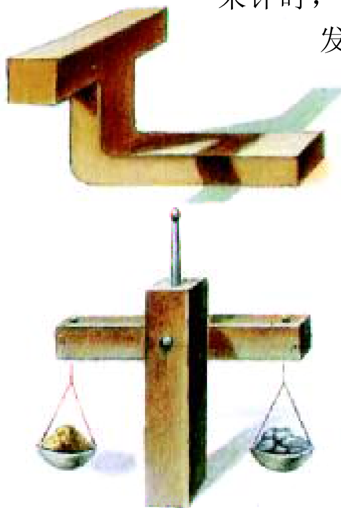
的参考物体或坐标系。相对于可见的恒星，惯性定律在相当高的近似程度上能够成立。我们现在如果使用一个与地球牢固连接的坐标系，那么，相对于该坐标系，每一恒星在一个天文日中的运行轨线都是一个具有莫大半径的圆，这个结果与惯性定律的陈述相反。因此，如果我们要遵循



伽利略和他的科学发现

伽利略（1564～1642 年），意大利天文学家、力学家、哲学家。

18 岁那年的一天，伽俐略到比萨教堂去做礼拜。他注意到教堂里悬挂的那些长明灯被风吹得一左一右有规律地摆动，他按自己脉搏的跳动来计时，发现它们往复运动的时间总是相等的。就这样他发现了摆的等时性。后来荷兰物理学家惠更斯根据这个原理制成挂摆时钟，人们称之为“伽利略钟”。



影子钟和天平　插图

早期的测量工具包括影子钟和天平。影子钟是利用影子在棒子上的位置而测量出时间；天平则是将已知重量的物体放于天平的一端，将待测物品放在另一边而称重。

伽利略根据阿基米德的学说，作了迅速确定合金成分的流体静力天平的研究，发明了可以测定物质密度的“小天平”，写出了名为《小天平》的论文。1588 年，他又发表了《固体的重心》的论文，引起学术界的注意。1589 年，在友人的推荐下，伽利略被比萨大学聘任为数学教授。

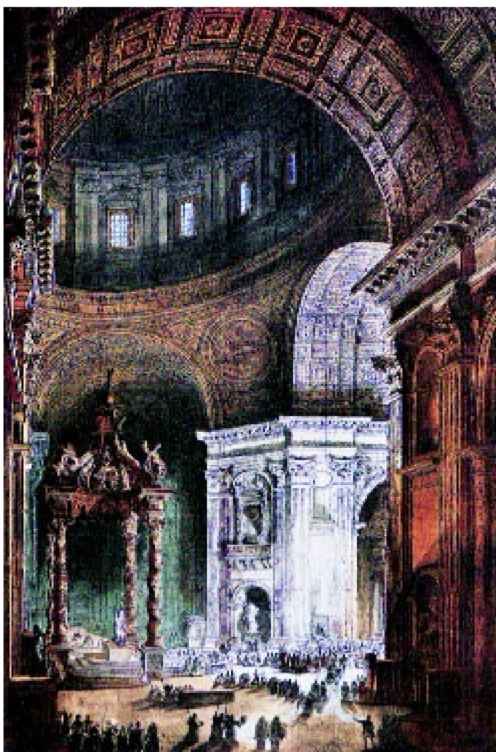
亚里士多德认为，两个物体以同一高度落下，重的比轻的先着地。伽利略经过反复研究与实验，得出了与之截然相反的结论：物体下落的快慢与重量无关。1590 年，伽利略在比萨斜塔公开做了落体实验，验证了亚里士多德的说法是错误的，使统治人们思想长达 2 000 多

惯性定律的原则来考察恒星的运动，就只能参照恒星[2]在其中不做圆周运动的坐标系。若惯性定律对于一坐标系的运动状态而言是成立的，该坐标系即为“伽利略坐标系”。伽利略－牛顿力学诸定律只有对于伽利略坐标系来说才能认为是有效的。

[2] 恒星：在各种天体之中，最基本的是恒星和星云。恒星是由炽热气体组成的，能自己发光的球状天体。它有很大的质量。夜空里的点点繁星，差不多都是恒星。人们用肉眼可以看到的恒星，全天就有6 000多颗。借助于天文望远镜，可看到几十万乃至几百万颗恒星。太阳是距离我们地球最近的恒星，而现在能够探测到的最远天体，距离地球约为200亿光年。恒星发光的能力有强有弱，表面的温度也有高有低。一般说来，恒星表面的温度越低，它的光越偏红；温度越高，光越偏蓝。而表面温度越高，表面积越大，光度就越大。恒星诞生于太空中的星际尘埃（科学家形象地称之为“星云”或者“星际云”）。恒星一生中最长的黄金阶段占据了整个寿命的90％。在这段时间，恒星以几乎不变的恒定光度发光发热，照亮周围的宇宙空间。在此以后，恒星将变得动荡不安，变成一颗红巨星；然后，红巨星将在爆发中完成它的全部使命，把自己的大部分物质抛射回太空中，留下的残骸，也许是白矮星，也许是中子星，甚至黑洞……　就这样，恒星来之于星云，又归之于星云，走完它辉煌的一生。

年的亚里士多德的学说第一次发生动摇。而应邀前来观看的一些著名学者却否认自己亲眼见到的一切，他们群起攻击伽利略。1591年，伽利略被比萨大学解聘。

1592年，伽利略来到威尼斯的帕多瓦大学任教，开始了他科学活动的黄金时期。在这一时期，他研究了大量的物理学问题，如斜面运动、力的合成、抛射体运动等。他还对液体与热学作了研究，发明了温度计。1609年，伽利略制成了天文望远镜。他发现：月球的表面凹凸不平，有高山深谷；木星有四颗卫星围绕它旋转；金星和月亮一样有盈有亏；土星有光环；太阳有黑子，能自转。银河是由千千万万颗暗淡的星星所组成的。这些发现为哥白尼、布鲁诺的观点提供了有力的证据。对教会的信条给予了沉重的打击。



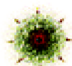
罗马教堂　油画　16世纪

伽利略所传播和证实的太阳中心说，由于抵触了教会所提倡的地球中心说的宇宙论，因此受到教会的审判和迫害。这幅图所刻画的罗马教堂就是中世纪欧洲的教会中心。



伽利略和他的望远镜　油画　17 世纪

1608 年 6 月的一天，伽利略根据一个荷兰人的研究，反复琢磨，不断改进，最后创造出了可以将原物放大 32 倍的望远镜。这以后，伽利略几乎每天晚上用自己的望远镜对向天空，探索宇宙的奥秘。他发现，银河是由许多小行星汇聚而成的；他还发现，太阳里面有黑点，这些黑点的位置不断地变动。因此，他断定太阳本身也在自转。



1632 年 1 月，伽利略在佛罗伦萨出版了《关于托勒密和哥白尼的两大世界体系的对话》。他在书中用三位学者对话的形式，作了四天的谈话。讨论了三个问题：①证明地球在运动；②充实哥白尼学说；③地球的潮汐。《对话》总结了伽利略长期科研实践中的各种科学发现，宣告了托勒密地心说理论的破产，动摇了教会的最高权威，从而推动了唯物论思想的发展。这部著作一经出版便受到广大读者的欢迎，但却遭到了罗马教会的反对，伽利略因此受到了长期的监禁。

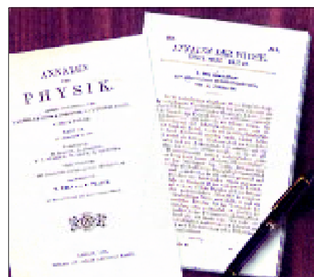
1636 年，伽利略在监狱中偷偷地完成了他一生中另一部伟大的著作《关于两种新科学的对话》。该书于 1638 年在荷兰出版。这部伟大著作同样是以三人对话形式写的。“第一天”是关于固体材料强度的问题，反驳了亚里士多德关于落体的速度依赖于其重量的观点；“第二天”是关于内聚作用的原因，讨论了杠杆原理的证明及梁的强度问题；“第三天”讨论了匀速运动和自然加速运动；“第四天”是关于抛射体运动的讨论。这一巨著从根本上否定了亚里士多德的运动学说。

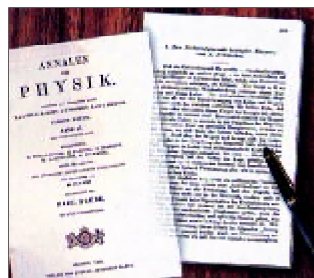
伽利略说：“这是第一次为新的方法打开了大门，这种将带来大量奇妙成果的新方法，在未来的年代里，会博得许多人的重视。”后来，惠更斯继续了伽利略的研究工作，他导出了单摆的周期公式和向心加速度的数学表达式。牛顿在系统地总结了伽利略、惠更斯等人的工作后，得到了万有引力定律和牛顿运动三定律。

爱因斯坦说：“伽利略的发现，以及他所用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正的开端！”

1.5 相对性原理（狭义）

为了使论述尽可能清楚明确，还是回到匀速行驶中的火车车厢上来。该车厢的运动我们称之为一种均衡平移运动（“均衡”是因为速度和方向是恒定的；“平移”是因为虽然车厢相对于路基不断改变位置，但在这样的运动中并没转动。）。假设一只大乌鸦在空中飞过，从路基上观察，它的运动





物理学杂志　封面

广义相对论完全建立的标志是1916年爱因斯坦在德国《物理学杂志》上发表的《广义相对论基础》。此图是1916年《物理学杂志》的封面以及《广义相对论基础》首页。

附：

什么是相对性原理

相对性原理是指物理定律在一切参考系中都具有相同的形式。它是物理学最基本的原理之一。爱因斯坦指出，不存在“绝对参考系”。在一个参考系中建立起来的物理规律，通过适当的坐标变换，可以适用于任何参考系。

相对性原理是由伽利略首先提出的。他认为，力学定律在一切惯性参考系中具有相同的形式，任何力学实验都不能区分静止和匀速运动的惯性参考系。这是经典力学的基本原理。

伽利略这样告诉我们：

把你和几位朋友关进一条大船甲板下面的大房间里，同时随身带上一



比萨斜塔　摄影

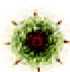
在1589年到1591年间，伽利略对落体运动作了细致的观察。从实验和理论上否定了统治千余年的亚里士多德关于“落体运动法则”，确立了正确的“自由落体定律”，即在忽略空气阻力的条件下，重量不同的球在下落时同时落地，下落的速度与重量无关。根据伽利略晚年的学生V．维维亚尼的记载，落体实验是在比萨斜塔上公开进行的。

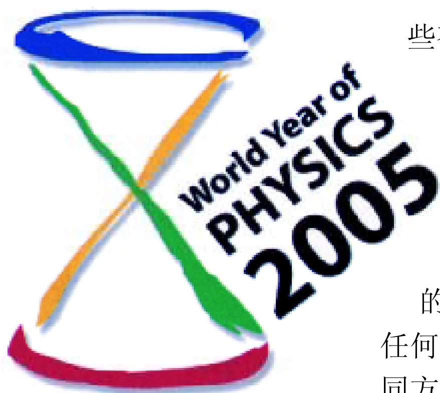
方式是匀速直线运动。我们可以用抽象的方式表述说：如果一质量 M 相对于一坐标系 K 做匀速直线运动，只要第二个坐标系 K_1 相对于 K 是在做匀速平移运动，则该质量相对于第二个坐标系 K_1 亦做匀速直线运动。因此，若 K 为一伽利略坐标系，则每一相对于 K 做匀速平移运动的坐标系 K_1 亦为一伽利略坐标系。相对于 K_1 来说，正如



计算将来　合成图片

虽然在原则上，量子电动力学定律允许我们去计算化学和生物学中的一切，我们在从数学方程预言人类行为方面并没有长足的进步。尽管这些现实的困难，大多数的科学家仍然自我安慰，认为在原则上，将来是可以预言的。但是由于不确定性原理的存在，它可以阻止我们同时准确知悉一个时刻的位置和速度，我们就无从开始。无论我们有多么好的计算机，我们输入的糟糕数据必定会得到糟糕的预言。





国际物理年标志

1905 年，爱因斯坦先后在德国《物理学杂志》上发表了五篇具有划时代意义的论文，提出了光量子理论，为量子理论的发展做出了重大贡献，还提出了狭义相对论并推导出了著名的质能方程。为纪念这一科学史上重大事件 100 周年，2004 年 6 月 10 日，联合国大会第 58 次会议通过 2005 年为“国际物理年”。此图为国际物理年的标志。

些苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫。再找一个大桶，装满水，在里边放几条鱼。找一个盛了水的瓶子挂起来，让它把水一滴一滴地滴进下面的一个细颈瓶里。船静止不动的时候，你可以观察到这些小飞虫以相同的速度飞往房内各个方向，鱼向不同的方向游动，水滴落进下面的瓶子里。你把任何东西扔给你的朋友，只要距离相等，朝不同方向扔所需的力量相等。你立定跳远，无论跳往哪个方向，距离都是一样。当你仔细观察了上述现象之后，用你想用的任何速度开船，只要运动是匀速的，也不忽左忽右地摆动，你就看不出上述各种运动有任何变化。你也不能通过它们中的任何一个现象来确定船是运动着呢，还是停着不动。归纳上述事实，就产生了物理学的相对性原理。

“相对”的情况在日常生活中也很常见。如从飞机内部看机上的乘客，他是坐在那儿不动的；从地面来观察，乘客却随飞机一起飞行。究竟乘客是静止的还是运动的，由观察者所参照的标准来决定。物理学上把这种参照标准称作参考系，并把相对于观察者是静止的或在做匀速直线运动的参考系统称为惯性系。

相对于 K 一样，伽利略－牛顿力学定律也是成立的。如此我们的推论在推广方面就前进了一步：K_1 是相对于 K 作匀速运动而无转动的坐标系，自然现象的运行相对于坐标系 K_1 与相对于坐标系 K 一样依据同样的普遍定律。这称为狭义相对性原理。

对相对性原理的正确性一开始就有强有力的论据来支持这两个普遍事实。经典力学虽然对一切物理现象在理论上的表述没有提供一个足够广阔的基础，但经典力学在相当大的程度上是“真理”，这仍然是我们所必须承认的，因为在对天体的实际运动的描述中，经典力学所达到的精确度简直

[1] 力学：力学又称经典力学，是研究通常尺寸的物体在受力情况下的形变，以及速度远低于光速的运动过程的物理学分支。力学是物理学、天文学以及许多工程学的基础。机械、建筑结构、航天器和船舰等的设计都必须以经典力学为基本依据。力学知识最早起源于对自然现象的观察和生产劳动中的经验。牛顿运动定律的建立标志着力学开始成为一门科学。力学可粗分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究力的平衡或物体的静止问题，运动学只考虑物体怎样运动，动力学讨论物体运动和所受力的关系。

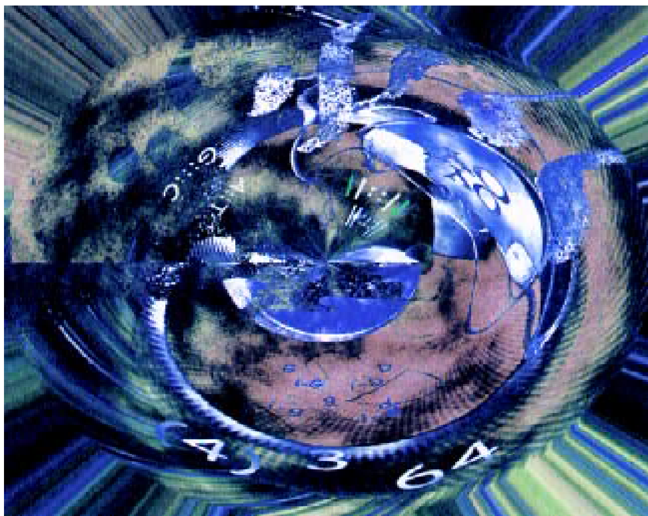


什么是相对论

相对论是现代物理学的理论基础之一，是关于物质运动与时间、空间关系的理论。它由爱因斯坦等人在20世纪初在总结实验事实的基础上建立和发展起来。在此之前，人们根据经典时空观解释光的传播等问题时，发生了一系列尖锐的矛盾。相对论根据这些问题，建立了物理学中新的时空观和高速物体的运动规律，对以后物理学的发展具有重大作用。相对论分为两个部分：狭义相对论和广义相对论。

星系　合成图片

这是表现爱因斯坦相对论的艺术图片。图片让人感觉到极具震撼力的美与和谐，但同时又让人感到玄奥，从而使相对论蒙上了更加神秘的色彩。



什么是狭义相对论

狭义相对性原理

物理定律在任何惯性参考系中具有相同的形式，这就是狭义相对性原理。爱因斯坦把伽利略相对性原理从力学领域推广到

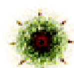


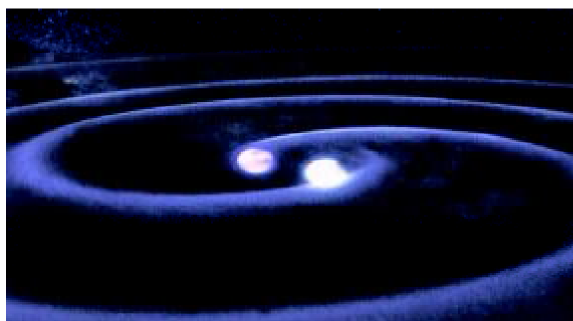
爱因斯坦的书桌　摄影　20 世纪

爱因斯坦的书桌，与其他物理学家堆满昂贵实验器材的实验室不一样，爱因斯坦进行理论研究时，所需要的只有笔和纸。

令人惊奇。因此，如果在力学[1]的领域中应用相对性原理，必然将会达到很高的准确度。一个在物理现象的一个领域内具有广泛的普遍性和极高准确度的原理，居然在另一领域中无效，从推理的观点来看是不大可能的。

我们现在来讨论第二个论据，此外，这个论据以后我们还将谈到。如果狭义相对性原理不成立，那么彼此作相对匀速运动的一系列伽利略坐标





闪电　合成图片

在《狭义与广义相对论浅说》中，爱因斯坦以浅显的语言和身边的事例讲述相对论的基本的原理，耀眼的闪电在爱因斯坦的追问下，这些平常的事物竟然也是如此不可思议。

包括电磁学在内整个物理领域，指出任何力学和电磁学实验都不能区分静止和匀速运动的惯性参考系。该原理是狭义相对论的基本原理。

1905 年，爱因斯坦完成了科学史上的不朽篇章《论动体的电动力学》，宣告了狭义相对论的诞生。它以光速不变原理和狭义相对性原理作为两条基本公设：一是光速不变原理，即在任何惯性系中，真空中的光速 c 都相同；二是相对性原理，即在任何惯性参考系中，自然规律都相同。这两条原理表面上看是不相容的，但只要放弃绝对时间的概念，那么这种表面上的不相容性就会消除。由此得出时间和空间各量从一个惯性系变换到另一个惯性系时，应该满足洛伦兹变换，而不是伽利略变换，并可由此得出众多结论：

（1）两事件发生的先后或是否“同时”，在不同参考系看来是不同的（但因果关系仍然成立）；

（2）量度物体长度时，将测到运动物体在其运动方向上的长度要比静止时缩短，即

系 K、K_1、K_2 等，对于描述自然现象就非等效。在此情况下，我们不得不相信对自然界定律的表述另有一种特别简单的形式。很明显，这只能在下列条件下才能做到，即我们的参考物体是一切可能有的伽利略坐标系中，对描述自然现象具有优点，并且具有特别的运动状态的坐标系（K）。这样我们就有理由称该坐标系是“绝对静止的”，而所有其他的伽利略坐标系 K 都是“运动的”。例如，将铁路路基设为坐标系 K_0，那么火车车厢就是坐标系 K。就 K 与 K_0 成立的定律来说，相对于坐标系 K 成立的定律远比相对于坐标系





球面与马鞍面　合成图片

物质的固有存在形式是以时间和空间为载体得以表现，物质通常赋予时空以正的曲率，正如一个球面。为了允许旅行到过去，时空必须具备负的曲率，正如一个马鞍面。

$$l=l'\sqrt{1-\frac{v^2}{C^2}}$$

与此相似，量度时间进程时，将看到运动的时钟要比静止的时钟进行得慢，即

$$\Delta t=\frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{C^2}}}$$

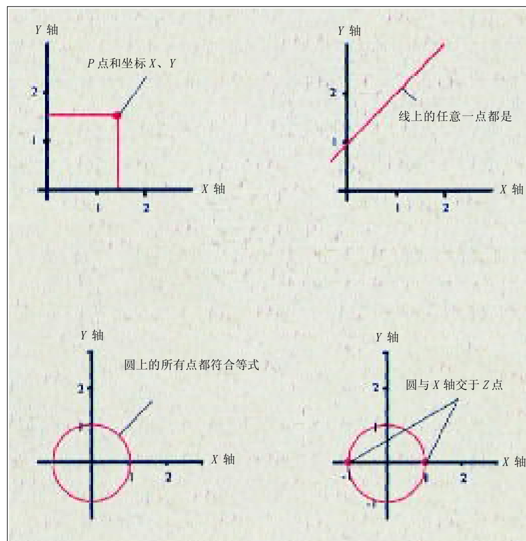
（3）物体质量 m 随速度 v 的增加而变大，即

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{C^2}}}$$

（4）任何物体的速度不能超过光速；

（5）物体的质量 m 与能量 E 之间的关系满足质能关系式 $E=mc^2$；

以上实验与大量实验事实相



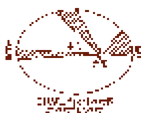
笛卡儿坐标　插图

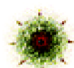
笛卡儿发现数学的两个分支代数和几何可以用来解决同一问题，例如要找到某一个点的坐标。笛卡儿这种数学思想的重要意义，不在于使代数或几何研究获得果实，而在于使同一个数学问题有了两种解法。在笛卡儿之后，数学家们可以任意利用和交流数学和几何这两方面的丰硕成果。

K_0 成立的定律简单。这种定律简单性的递减是由于车厢 K 相对于 K_0 而言是"真正"运动的。在参照 K 所表述的普遍的自然界定律中，车厢速度的大小和方向有必然的作用。这正如一个风琴的大小和方向必然是起作用的一样，一个风琴管的轴与运动的方向平行或垂直时，所发出的音调将是不同的。

由于地球在环绕太阳的轨道上运动，因而我们可以把地球比作火车车厢，只不过这节车厢是以每秒大约 30 公里的速度行驶。如果相对性原理不正确，我们就因而预料到地球的运动方向在任一时刻将随时会在自然界定律中表现出来，而且物理系统的行为也随其相对于地球的空间取向而定。因为公转速度[2]的方向的变化，所以地球不可能相对于假设

[2] 公转速度：地球绕太阳的运动，叫做公转。地球公转的路线叫做公转轨道。它是近似正圆的椭圆轨道。太阳位于椭圆的两焦点之一。每年 1 月初，地球离太阳最近，这个位置叫做近日点；7 月初，地球距离太阳最远，这个位置叫做远日点。地球公转的方向与自转的方向相同，也是自西向东。





符合，但只有在高速运动时，效果才显著。在一般情况下，相对论效应极其微小，因此牛顿力学可认为是相对论力学在低速情况下的近似。

爱因斯坦以前的人们

人们对时空的认识，随着社会与科学的发展而不断加深。

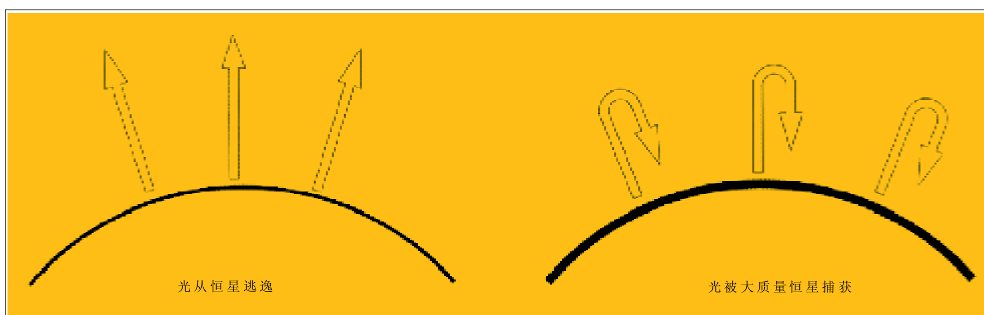
亚里士多德 古希腊的亚里士多德是最早对时空进行系统认识的人。他认为，大地是球形的，地球是宇宙的中心，一切物体都有达到它天然位置的倾向，这样，他把空间与物体的位置联系起来。亚里士多德又进一步把时间与物体的运动联系起来，认为时间是描述运动的数。

哥白尼 16 世纪，哥白尼出版了《天体运行论》，提出了地球绕太阳运行、太阳是宇宙中心的观点，这样使地球失去了它在空间中的优越地位。



海德堡大学　摄影

海德堡的历史源远流长。早在遥远的洪荒时代，这里已是远古人类生活、栖息的所在。今天，海德堡还是德国乃至欧洲的一大科研基地，这里先后出过十位诺贝尔奖得主。除大学研究机构外，该市还设有马普协会的四个研究所（原子物理、医学、天文和外国法律），欧洲分子生物实验室，德国癌症研究中心等科研机构。其研究成果在世界上都享有一定声誉。



的坐标系 K_0 处于静止状态。然而，最小心仔细的观察也从没显示出地球实际空格（空间）的这种不同方向的物理不等效性，也就是各向异性。这一论据对相对性原理的支持是强有力的。

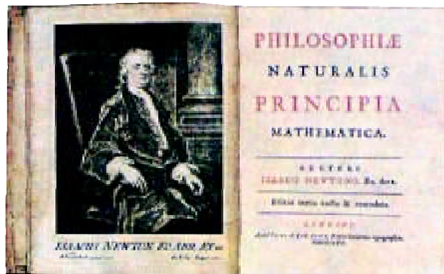
米歇尔理论　示意图

黑洞的存在是我们认为时间对任何观察者并非总是增加的原因。1783 年米歇尔经过对黑洞的研究提出了论断：可能存在比太阳更大质量的恒星，其逃逸速度超过光速，因为任何发出的光都被这些恒星的引力拖拽回去，所以我们就不能看到它们。这就是米歇尔叫做暗星而我们现在叫做黑洞的东西。

伽利略　伽利略在对时空作进一步考察后，提出了相对性原理，即一个相对于惯性系做匀速直线运动的系统，其内部所发生的一切力学过程，都不受到系统作为整体的匀速直线运动的影响。进而考虑两个惯性参照系 S 与 S'，令 S' 沿 x 轴方向以速度 v 做匀速直线运动，则两参照系中的坐标变换为：

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

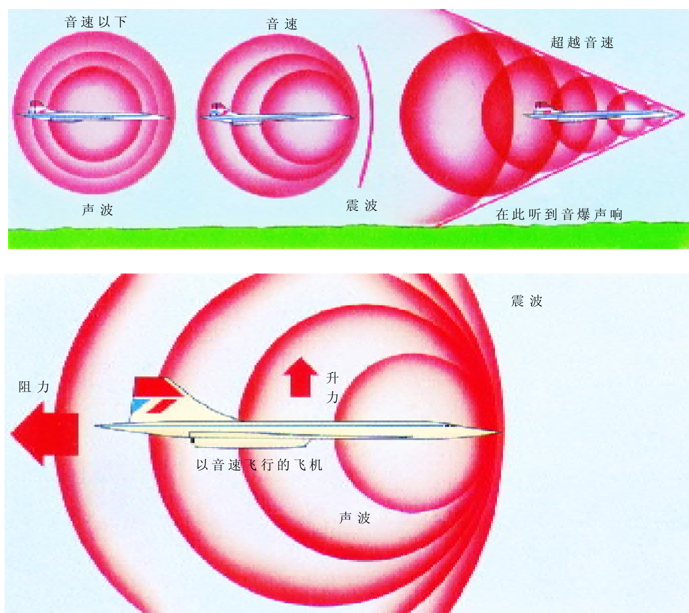
这就是所谓的伽利略坐标变换。从上述变换式中可知，在做相对运动的、不同的坐标系中测定的时间是相同的，即 $t' = t$。因此在伽利略看来时间是绝对的、普适的。由 $x' = x - vt$，式中包含了空间不变性，即绝对空间的观点：认为在两个惯性系中量得同一尺或物的长度是相同的。



《自然哲学的数学原理》　书影

在牛顿的经典力学体系中，时间和空间都具有绝对意义。牛顿的这些思想全部记录在其著作《自然哲学的数学原理》中。图为这本书的扉页，左边是牛顿的肖像。

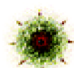
牛顿　17 世纪，牛顿在建立经典力学体系后，进一步丰富与发展了时空的概念，同时牛顿为了能找到一个使经典力学体系成立的参考系，而引入了绝对空间与绝对时间的概念。牛顿的绝对空间认为，空间像一个大容器，它为物体的运动提供了一个场所。无论是物体放进去也好，取



超音速飞行　示意图

当飞机以音速飞行时，压力波会在飞行器前面堆积成震波。该震波会产生一种拉力，将飞行器向后拉，若此时飞行器加速突破音障，震波将会被打散，并且在飞行器通过以后以音爆的形式传播。图为超音速飞行的示意图。

出来也好，这个空间本身并不会发生什么变化。牛顿认为，这种绝对的空间按其实质永远是均匀和不动的，与任何外界情况无关。牛顿为了证明绝对空间的存在。还专门设计了一个著名的水桶实验，以此来证明绝对空间的确实存在，牛顿的绝对时间认为，“绝对的、真的及数学的时间，按其自身并按其本质来说在均匀地流动着，与外界任何现象都没有关系。此时间也可名为延续”。而且从“宇宙时钟”敲响的时候起，整个宇宙都对好了自己的钟表，时间的快慢到处都一样。



由于牛顿的绝对时空观完全离开了物质和物质的运动而独立存在，同时还存在着许多问题与矛盾，如绝对时空与伽利略相对性原理不相容，绝对运动又无法去测定等等，对这些问题牛顿本人也清楚地认识到了。正如爱因斯坦所言：“牛顿自己比他以后的许多博学的科学家都更明白他的思想结构中固有的弱点。”正因为如此，牛顿的绝对时空从一开始就相继受到了许多科学家的反对，如莱布尼兹、惠更斯、贝克莱等。

马　赫　19 世纪后半叶，马赫在《力学史》中对牛顿的绝对时间与绝对空间提出了尖锐的批评。他认为，牛顿力学的绝对时空观缺乏经验事实的根据，是站不住脚的。他对牛顿的水桶实验作了新的解释，这一观点后来深深地影响了爱因斯坦。

马赫对牛顿绝对时空的批判只是定性的，1889 年爱尔兰物理学家菲茨杰拉德在《以太和地球的大气层》一文中提出了“收缩”假说。这个假设是指保持静止“以太”的观念，而认为物体在“以太”中运动时，在运动方向上其长度会发生收缩。这一假说成功地解释了地球在“以

太”中运动所造成的光程差。



麦克斯韦　摄影

麦克斯韦是19世纪英国剑桥数学物理学派的顶峰。剑桥学派的工作使偏微积分方程几乎成为“数学物理”的同义语，而麦克斯韦在1864年推导出的电磁场方程，更是19世纪数学物理最壮观的胜利。

麦克斯韦　1865年，麦克斯韦在《电磁场的动力学理论》中，从波动方程得出了电磁波的传播速度，并且证明：电磁波的传播速度只取决于传播介质。

赫　兹　1890年，赫兹把麦克斯韦的电磁场方程改造得更加简洁。他指出，电磁波的波速（即光速）c，与波源的运动速度无关。这个结论与伽利略的变换相抵触。

洛伦兹　为了解决这些矛盾，1892年，洛伦兹提出了长度收缩假说，用以解释以太漂移的零结果，同时发展了动体的电动力学。他假设以太是绝对静止的，从他的电磁理论推出了菲涅尔曳引力系数。

1904年，洛伦兹在《运动物体小于光速的电磁现象》一文中提出，只要假定相对运动的坐标系之间存在一定的数学变换关系，则麦克斯韦方程组对于各匀速运动的坐标系就会保持不变。这就是有名的洛伦兹变换。后来，洛伦兹给出了洛伦兹变换的具体形式：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x-vt}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=\dfrac{t-\dfrac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

但洛伦兹认为 t' 不代表真正的时间，只是为了方便而引入的，他认为只有 t 才是真正的时间。从这里我们可看出，洛伦兹尽管



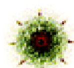
巴黎大学　摄影

法国的国立大学，欧洲最古老的大学之一。1231年创立于巴黎，当时设文、医、法、神四学院。1971年起分为13所大学，以“巴黎第一大学”等相称。分别设有哲学、历史、语言、文字、戏剧、艺术、法律、政治、化学、医学、物理学等系种。



国际物理年某纪念会场的入口标志　摄影

“国际物理年”是联合国大会宣布通过，以纪念爱因斯坦的相对论原理对世界的影响而设立的。图为国际物理年某纪念会场的入口标志，该标志以爱因斯坦的著名公式的第一个字母作为设计源泉。



提出了洛伦兹变换，但还只是以保留以太为前提，人为地引入了大量假设，致使概念庞杂，逻辑混乱，尽管已经走到了狭义相对论的边缘，却最终与它失之交臂。

拉摩　1895年，英国物理学家拉摩发现了外磁场中电子的运动。1898年，他完成了《以太和物质》一文，文中不但包含了精确的变换方程，而且还推出了洛伦兹长度收缩假设。

彭加勒　1895年，法国著名科学家彭加勒质疑洛伦兹理论，对用长度收缩假说解释以太漂移的零结果表示不同看法。1898年，他在《时间的测量》中指出，由于人们对于两个时间间隔的相等没有直觉，要从时间测量的定量问题中分离出同时性的定性问题，十分困难。1902年，彭加勒在《科学的假设》中，对牛顿的绝对空间提出质疑：

“没有绝对空间。我们可以设想的只是相对运动，可是通常在阐明力学事实时，却似乎假设了绝对空间存在，把力学事实归诸绝对空间。”

“没有绝对时间。说两个持续时间相等，本身毫无意义，只有通过约定才能得到这一主张。”

“我们对两个持续时间相等没有直接的直觉，同时，对发生在不同地点的两个事件的同时性也没有直接的感觉。”

“力学事实是根据非欧几里得空间陈述的。非欧几里得空间是一种不



跨海大桥　摄影

牛顿的绝对时空观在经典物理学大厦建成后的200多年里并没有遇到任何挑战。实际上直到今天跨海大桥的建造原理仍深刻地印证了牛顿的物理学理论。

大方便的向导，但它的合理性等同于我们通常的空间。”

1904 年，彭加勒提出了“相对性原理”。他说：“相对性原理就是根据这个原理，对于固定不动的和匀速平移的观察者而言，各种物理现象的规律应该是相同的，因此，我们没有任何方法来判断我们是否处于匀速运动之中。”

1905 年，彭加勒在《电子的电动力学》中说：“表明绝对运动的不可能性是自然界的普遍规律。”他还对洛伦兹变换进行整理，使它的数学形式更加简洁。他指出，与洛伦兹变换相关的，是不同参照系里测量到的空间和时间的坐标，因此是一种真实的变换。于是，长度收缩不再是一种特定假设，而是满足物理学的相对性原理的结果。

此时，彭加勒已经非常接近相对论的实质，不过他的论文还没有正式发表，爱因斯坦的论文《论动体的电动力学》就已经横空出世。

狭义相对论的出世历程

1895 年，16 岁的爱因斯坦在瑞士阿劳州中学上学时，无意中想到一个悖论：如果以光速追随另一条光线运动，那么我们将看到，这条光线就好像一个在空间振荡而停止不前的



爱因斯坦塔　摄影

这是位于德国波茨坦大学内的爱因斯坦塔，其主要功能是作为太阳系的观测台。世界各地为纪念爱因斯坦的伟大贡献修建了很多纪念馆、纪念碑。但是只有爱因斯坦的质能方程才是真正意义上的永恒丰碑。

相对论的影响　漫画

在《汤普金先生奇遇记》一书中，作者物理学家嘉莫创造了一个职员汤普金先生的形象。汤普金读了相对论的书后，梦见自己到了另一个世界，这里的光速只有每秒 15 公里。许多相对论预测的效应都很容易观察到。这本虚构的小说从侧面反映了相对论在人们的社会生活中产生的影响。







沙漏　摄影

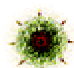
时间的特点是一维性，即不可逆性，因此时间之沙只往一个方向流动。当宇宙的更漏倒置时，这个方向会改变吗？

电磁场。可是，无论依据经验，还是按照麦克斯韦方程推断，都不会发生这样的事情。直觉告诉他，从这样一个观察者的观点来判断，一切就应该像一个相对于地球是静止的观察者角度所看到的那样，按照同样的定律进行。这个悖论使爱因斯坦感到惊奇，并在他心底沉睡了10年。

当然，少年爱因斯坦比较偏重于经验论，热衷于用观察和实验来研究物理学的主要问题。他根本就没有意识到，这个悖论中已经包含了相对论的萌芽。

1896年，爱因斯坦进入了苏黎世大学，他计划完成检测地球运动引起光速变化的实验，可是，他不能建造这个实验的设备。

爱因斯坦研究了光现象和电磁现象与观察者运动的关系，企图修正麦克斯韦方程，但是他没有成功。



当然，要协调麦克斯韦理论与相对性原理，不变更传统的时间观念是不行的。爱因斯坦说："只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要满意地澄清这个悖论的尝试，都注定要失败。清楚地认识这条公理以及它的任意性，实际上就意味着问题的解决。我阅读了休谟和马赫的哲学著作，这使我具备了我所需要的批判思想，同时获得了决定性的进展。"

自从突破了传统的时空观念，爱因斯坦势如破竹，只用了五六周时间就一气呵成，在1905年6月写成了相对论的第一篇论文《论动体的电动力学》。

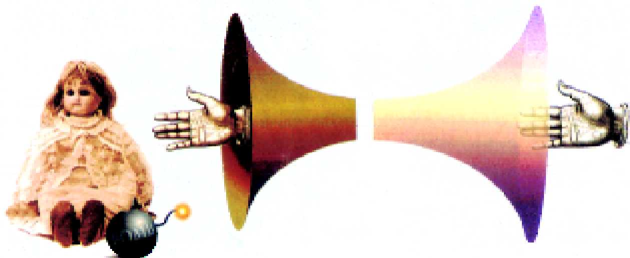
狭义相对论的解读

背景

到19世纪末，经典物理理论已经相当完善，当时物理学界较为普遍地认为物理理论已大功告成，剩下的不过

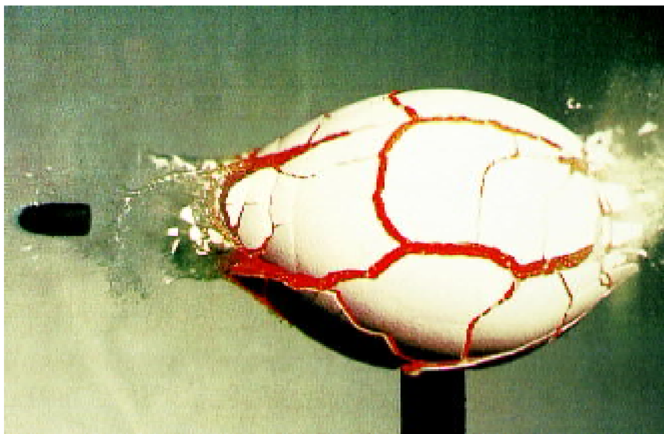
时空的穿梭　合成图片

相对论的提出使时空的穿梭成为可能。但是如果一个人可以自由地改变过去，则他就会遇到矛盾：假定一个人回到以前，当他的先祖父还是小孩时将他杀死，这个人还会出现在以后吗？



是提高计算和测量的精度而已。然而某些涉及高速运动的物理现象显示了与经典理论的冲突，而且整个经典物理理论显得很不和谐：①电磁理论按照经典的伽利略变换不满足相对性原理，表明存在绝对静止的参考系，而探测绝对静止参考系的种种努力均告失败；②似乎存在着经典力学无法说明的极限速度；③电子的质量依赖于它的速度。在这种形势下，有见地的物理学家预感到物理学中正孕育着一场深刻的革命。爱因斯坦立足于物理概念要以观察到的事实为依据，而不能以先验的概念强加于客观事实。他考察了一些普遍的物理事实和经典物理学中如运动、时间、空间等基本概念，得出以下两点具有根本意义的重要性，并把它们作为建立新理论的基本原理：①狭义相对性原理，不仅力学实验，而且电磁学实验也无法确定自身惯性系的运动状态。也就是说，在一切惯性系中的物理定律都具有相同的形式；②光速不变原理，即真空中的光速对不同惯性系的观察者来说都是 c。承认这两条原理，牛顿的绝对时间、绝对空间观念必须修改，异地同时概念只具有相对意义。在此基础上，爱因斯坦建立了狭义相对论。





射穿鸡蛋　摄影

物理学中的速度是描述物体位移的物理量，包括物体移动的速率与移动的方向。这张图片是摄影机拍下的一颗子弹以450米/秒的速度穿越一个生鸡蛋的瞬间景象。

内容

洛伦兹变换　根据相对性原理和光速不变原理，可导出两个惯性系之间时空坐标之间的洛伦兹变换。当两个惯性系 S 和 S' 相应的笛卡儿坐标轴彼此平行，S' 系相对于 S 系的运动速度 v 仅在 x 轴方向上，且当 $t=t'=0$ 时，S' 系和 S 系坐标原点重合，则事件在 S 系和 S' 系中时空坐标的洛伦兹变换为

$x'=\gamma(x-vt)$，$y'=y$，

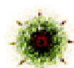
$z'=z$，$t'=\gamma(t-vx/c^2)$

式中 $\gamma=(1-v^2/c^2)^{-1/2}$，$c$ 为真空中的光速。洛伦兹变换是狭义相

对论中最基本的关系，狭义相对论的许多新的效应和结论都可从洛伦兹变换中直接得出，它表明时间和空间具有不可分割的联系。当速度远小于光速，洛伦兹变换退化为伽利略变换，经典力学是相对论力学的低速近似。

同时性的相对性　在某个惯性系中看来异地发生的两个事件是同时的，那么在相对于这一惯性系运动的其他惯性系看来就不是同时的，因此在狭义相对论中，同时性概念不再具有绝对的意义，只具有相对的意义。不仅如此，在不同惯性系看来，两异地事件的时间顺序还可能发生颠倒，但是具有因果联系的两事件的时间顺序不会发生颠倒。同时性的相对性是狭义相对论中非常基本的概念，时间和空间的许多新特性都与此有关。

长度收缩　狭义相对论预言，一根沿其长度方向运动速度为 v 的杆子的长度 l_0 比它静止时的长度 l 要短，



$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

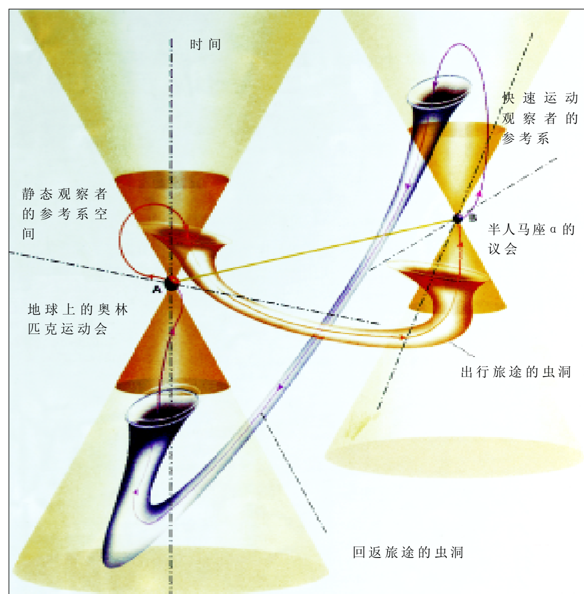
长度收缩不是物质的动力学过程，而是属于空间的性质。它是由于测量一根运动杆子的长度须同时测量其两端，在不同惯性系中，同时性具有相对性，因而不同惯性系中得出的结果不同，只具有相对的意义。

时间延缓　狭义相对论预言，运动时钟的时率比时钟静止时的时率要慢。设在 S' 系中静止的时钟测得某地先后发生两事件的时间间隔为 τ，在 Σ 系中，这两个事件不是发生在同一地点，须用较准确的同步钟测量，测得它们先后发生的时间间隔为 τ，$\Delta\tau=\Delta_t\sqrt{1-v^2/c^2}<\Delta_t$。时间延缓是同时性的相对性的结果，是时间的属性。不仅运动时钟的时率要慢，一切与时间有关的过程，如振动的周期、粒子的平均寿命等都因运动而变慢。

速度变换公式　按照

空间旅行　合成图片

一位空间旅行者可以利用相对于地球静止的虫洞作为从事件 A 到 B 的捷径，然后通过一个运动的虫洞返回，并且在他出发之前回到地球。





狭义相对论，当 S' 系和 S 系相应坐标轴彼此平行，S' 系相对于 S 系的速度 v 沿 x 方向，则质点相对于 S 系的速度 $u=\{u_x, u_y, u_z\}$ 和相对于 S' 系的速度 $u'=\{u'_x, u'_y, u'_z\}$ 之间的变换关系为

$$u_x'=\frac{u_x-v}{1-\frac{v}{c^2}u_x}$$

$$u_y'=\frac{u_y\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-\frac{v}{c^2}u_x}$$

$$u_z'=\frac{u_z\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-\frac{v}{c^2}u_x}$$



人的出生　合成图片

宇宙具有多重历史，宇宙的诞生一直是人类研究的课题，它并不像人类的出生那么简单，不过，爱因斯坦量子理论的提出还是为我们的研究提供了理论上的支持。

双子悖论　合成图片

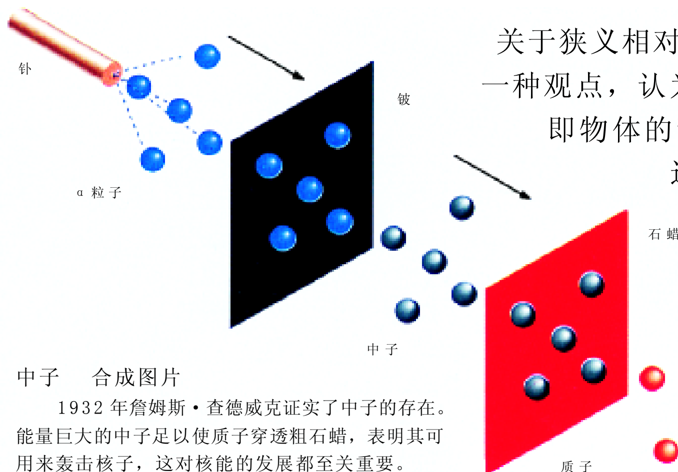
“双子悖论”最初是作为反对相对论的一个证据被提出的。一位太空旅行者如果以地球为参照系，由于其告诉飞行的时间流逝比地球慢些，他返回地球时应比留在地球上的孪生兄弟年轻。但如果以飞船为参照系，那么出于同样的理由，得到的结论却是他比兄弟年老。



当 v 远远小于光速 c 时，相对论速度变换公式退化为伽利略速度变换公式。

相对论多普勒频移　设光源相对静止时发射光的频率为 ν_0，当光源以速度 v 运动时，接收到光波频率为 $v=$ 0，狭义相对论预言，$\nu=\nu_0/\sqrt{1-v^2/c^2}(1-v\cos\theta)$，式中 θ 为光源运动方向与观测方向之间的夹角。与经典的多普勒效应不同，存在着横向多普勒频移，当光源运动方向与观测方向垂直时，$\theta=90°$，则 $\nu=\nu_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$。横向多普勒频移是时间延缓的效应。

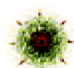
质速关系　狭义相对论预言，与经典力学不同，物体的质量不再是与其运动状态无关的量，它依赖于物体的运动速度。运动物体速度为 v 时的质量为 $m=m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$，式中 m_0 为物体的静质量，当物体的速度趋于光速时，物体的质量趋于无穷大。



中子　合成图片

1932 年詹姆斯·查德威克证实了中子的存在。能量巨大的中子足以使质子穿透粗石蜡，表明其可用来轰击核子，这对核能的发展都至关重要。

关于狭义相对论中的质量，还存在另一种观点，认为只有一种不变的质量，即物体的静质量，无法明确定义运动质量。两种观点对于狭义相对论的基本看法上没有分歧，只是对质量概念的引入上存在分歧。后一种观点在概念引入的逻辑严谨性上更为可取，而前一种观点对于某些物理现象，如回旋加速器的加速限制、康普顿效应以及光线的引力偏折等，作浅显说明颇为有效。



质能关系　狭义相对论最重要的预言是物体的能量 E 和质量 m 有当量关系：$E=mc^2$。与物体静质量 m_0 相联系的能量 $E_0=m_0c^2$。质能关系是核能释放的理论基础。

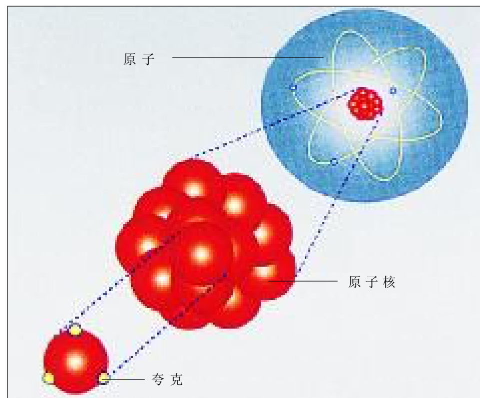
能量动量关系　狭义相对论中动量定义为 $P=m_0v/\sqrt{1-v^2/c^2}$，能量动量关系为 $E^2=c^2p^2+m_0^2c^4$。

极限速度与光子的静质量　真空中的光速 c 是一个绝对量，是一切物体运动速度的极限，也是一切实在的物理作用传递速度的极限。从质速关系可以看出一切以光速 c 运动的物质的静质量必为零，光子的静质量为零。

在狭义相对论中，牛顿定律 $f=ma$ 的形式不再成立，它在洛伦兹变换下不能保持形式不变，因而它不满足相对性原理而必须修改，代替的力学规律的形式是 $f=dp/dt$，式中 p 为物体的动量。电磁场的麦克斯韦方程组和洛伦兹公式 $f=q(E+v\cdot B)$，在洛伦兹变换下形式保持不变，它们是狭义相对论的电磁规律。在狭义相对论中，动量守恒、能量守恒定律仍然成立，能量守恒包括了质量守恒。

夸克　合成图片

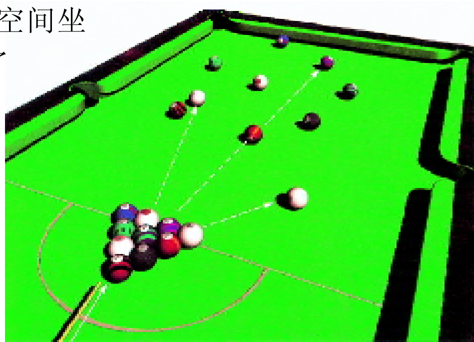
1964 年，粒子物理学家热尔曼提出了夸克的存在。夸克与基本粒子的关系就像质子、中子和原子核的关系。



在经典物理学中，物理定律总是表述为把时间坐标和空间坐标分



开来，洛伦兹变换表明，时间坐标和空间坐标应作统一处理。H. 闵可夫斯基发展了狭义相对论的形式体系，采用在四维时空中表述物理定律和公式。这样的表述，相对论的协变性质表达得更为明晰，物理定律的形式更为简洁，许多问题的求解也更为简便。



康乐球　摄影

在任何的闭合系统中无序度总是随时间而增加，这是穆菲定律的一种形式：事情总是趋向于越变越糟！康乐球就是一个闭合系统，一开始球处于一种高度的有序状态。但是一旦游戏开始，球就变得无序，人们要想打一杆而使所有球回到它们开始的位置是不可能的。

意 义

狭义相对论经受了广泛的实验检验，所有的实验都没有检测到同狭义相对论有什么不一致的结果。狭义相对论是基础牢靠、逻辑结构严谨和形式完美的物理理论。广泛应用于许多学科，它和量子力学成为近代物理学的两大理论支柱。在现代物理学中，成为检验基本粒子相互作用的各种可能形式的试金石。只有符合狭义相对论的那些理论才有考虑的必要，这就严格限制了各种理论成立的可能性。

多普勒效应

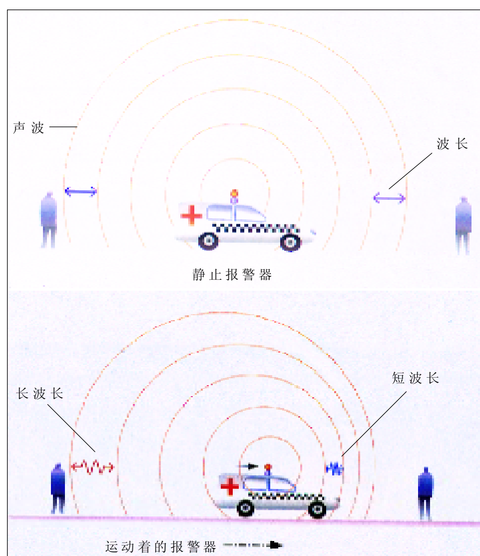
波源与观察者（接收器）间有相对运动时，观测到的波频率与波源发出的波频率不同的现象，也称多普勒频移。1842 年由奥地利物理学家多普勒发现。关于多普勒效应理论有两种：

（1）经典的多普勒效应。以经典理论处理多普勒效应问题，适用于以弹性介质为媒体的普通机械波。设介质静止不动，波源频率为 v_0，波在介质中的传播速度为 v，若波源和接收器分别以速度 u_1 和 u_2 沿两者的连线运动，则接收到的波频率为



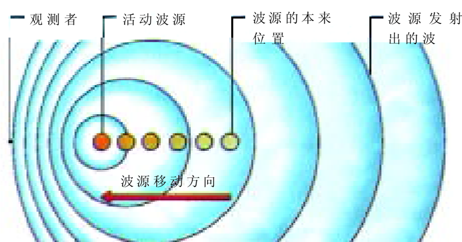
格林威治天文台　摄影

英国格林威治皇家天文台是在伦敦市郊，周围是热闹的格林威治小镇中心，天文台在镇子外一个大公园式的小土丘顶上，是世界时间的核对标准。



多普勒效应　合成图片

多普勒效应是包括声波和电磁波在内的所有波的一个性质。当一个发射源，诸如急救车警报器向着观察者行驶来时，波就会向更高频率位移。当它离开接收者而去时，波就会向更低频率位移。



多普勒—费索效应　插图

奥地利物理学家多普勒于1842年，法国物理学家费索于1848年，先后发现的这一现象发生于一振动源或辐射源相对观测者运动之时。观测者所听或看到的声波或光波频率会因此而发生变化，如果光源或声源向观测者方向接近，其频率会变大，反之频率变小。

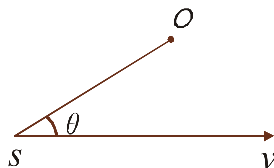
$$\nu=\frac{v-u_2}{v-u_1}\nu_0$$

根据上式，无论是波源运动还是观测者运动，或者两者同时运动，波源和观测者接近时接收到的频率增加，远离时接收到的频率减小。

（2）光学多普勒效应。以相对论理论为基础处理光波（或电磁波）的多普勒效应。光波与机械波不同，不需要任何介质而能在真空中传播；根据光速不变原理（见狭义相对论），真空中的光速在任何惯性参考系中有相同数值，光学多普勒频移只决定于光源和观测者间的相对运动速度。设静止光源所发光波频率为 ν_0，相对运动速度的大小为 v，观测方向角（观测者和光源的连线与相对运动方向间的夹角）为 θ，如下图，S 为光源，O 为观测者。接收到的光波频率为

$$\nu=\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta}\nu_0$$

式中 $\beta=v/c$，c 为真空中的光速。可以证明，经典的多普勒频移公式只是上式的一级近似。当 $\theta=\pi/2$ 时，$\nu(\frac{\pi}{2})=\sqrt{1-\beta^2}\,\nu_0$，频率改变是 β 的二级效应，称为横向多普勒效应。

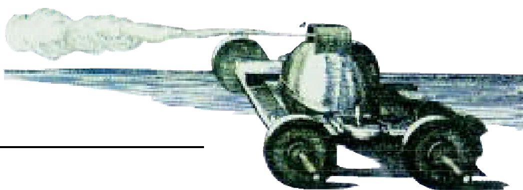


1.6 经典力学中的速度相加定理

假设我们的老朋友火车车厢以恒定的速度 v 在铁轨上行驶；并且有一个乘客在车厢里以速度 w 沿行驶方向从车厢一头走到另一头。那么对于路基而言，乘客向前走得有多快呢？简单地说，乘客前行的速度 w 有多大呢？唯一可能的解答只能根据下列考虑而得：如果车厢中的乘客停止行动一秒钟，相对于路基而言他

气流车　合成图片

这辆车的动力来自气流，因此称为“气流车”。这幅图是想象出来的，画这车的用意是要说明牛顿的第三定律：任何一种力在作用时，必有一股反作用力产生，而两种力同样大。



附：

速度

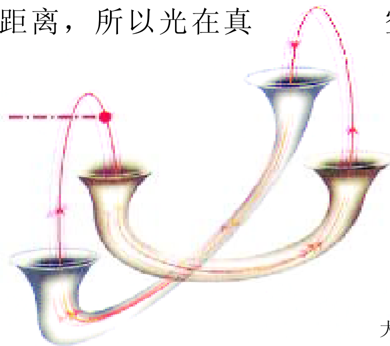
速度，指描述物体位置变化快慢和方向的物理量。位移和所历时间之比，称为这段时间内的“平均速度”。如果这一时间极短（趋近于零），这一比值的极限称为物体在该时刻的速度或者“瞬时速度”。速度是矢量，它的方向在直线运动中沿直线方向，在曲线运动中沿运动轨道的切线方向。

简单地说，速度就是描述物体运动快慢的物理量，定义为位移随时间的变化率。

定义式为：　v（速度）＝ d（位移）/ t（时间）

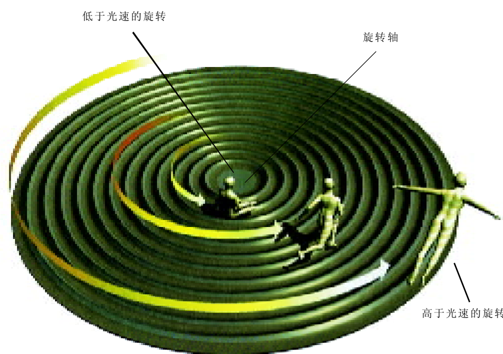
在国际单位制中，速度的最基本单位是米每秒，国际符号是m/s，中文符号是米/秒。因为国际单位制定义1米是光在真空中1/299 792 458秒移动的距离，所以光在真空中的速度是299 792 458米/秒。

速度和速率不同，速度是矢量，有方向性，所以可有负值；速率没有方向性，所以没有负值。



虚粒子　合成图片

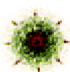
虚粒子会多次通过时空同一点并使能量密度变得非常大。



刚体在平坦空间中的运动　合成图片

平坦宇宙在空间上是有限的，所以就存在一个旋转的临界速度，低于这个临界速度时宇宙中任何部分都旋转得比光慢。就像在平坦的空间中刚体的运动速度，在远离其轴时，刚体的转动比光速还要快。

在这一秒钟里前进了一段距离 v，在数值上与车厢的速度相等。但他在以恒定速度前行的车厢中向前走动，在这一秒钟里他相对于车厢，也就是相对于路基多走了一段距离 w，这段距离在数值上等于乘客在车厢里走动的速度。因而，在所考虑的这一秒钟里该乘客总共相对于路基走了距离 $W=v+w$。我们随后将会看到，这一表述经典力学的速度相加定理的结果，是不能加以支持的；换句话说，我们刚才写下的定律是不成立的，但我们暂时认为它是正确的。



分子的分布　合成图片

热力学第二定律陈述道：一个孤立系统的熵总是增加的，并且将两个系统连接在一起时，其合并系统的熵大于所有单独系统的熵的总和。譬如，考虑一盒气体分子的系统，分子可以认为是不断互相碰撞，并不断从盒子壁反弹回来的康乐球。气体的温度越高，分子运动得越快，这样它们撞击盒壁越频繁越厉害，而且它们作用到壁上的向外的压力越大。如图中分子散开成占据整个盒子的更无序的状态，所以人们说气体的熵增加了。

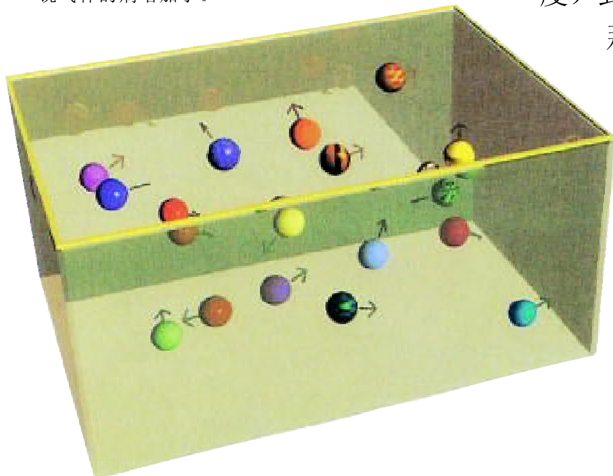
加速度

描述运动物体的速度变化快慢程度的物理量。它是矢量，其合成与分解遵从平行四边形法则（作用在一个点上的两个力，其合力亦作用在该点上。合力的大小等于以两力大小为边的平行四边形的对角线的长度，方向是由该点出发的四边形对角线方向）。加速度是以速度的变化量跟发生这种变化所经过的时间的比值来量度的。物体在做直线运动时，如果在某一时刻 t_0 的速度是 v_0（初速度）到时刻 t 的速度变为 v_t（末速度），那么 v_t-v_0 就称为在 $t-t_0$ 这段时间内的速度变化量，用 a 代表加速度，其表达式为

$$a=\frac{v_t-v_0}{t-t_0}$$

如果 $t_0=0$，则上式可写成

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}$$



1.7 光的传播定律与相对性原理的表面抵触

真空中光的传播定律是物理学中最简单的定律，每一学校里的儿童都知道，或者我相信他们都能了解，光在真空中沿直线以速度 c=300 000 公里 / 秒传播。 这个速度在所有各色光线中都一样。因为如果不是这样，则当一颗固定的



虹　素描

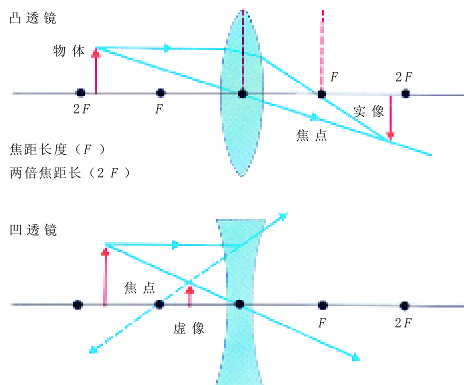
人们看到虹时总有惊艳的感觉。古代的人往往用神秘的特性来解释虹。从中世纪起，科学家开始研究虹，不过牛顿是第一位正确说明虹原理的人。图中，水面上的虹是瀑布飞溅的水滴造成的。

附：

光学

光学是物理学的一个部门。光学的任务是研究光的本性，光的辐射、传播和接收的规律，光和其他物质的相互作用（如物质对光的吸收、散射、光的机械作用和光的热、电、化学、生理效应等）以及光学在科学技术等方面的应用。

光学的历史　光学的历史可以追溯到两三千年前。中国先秦思想

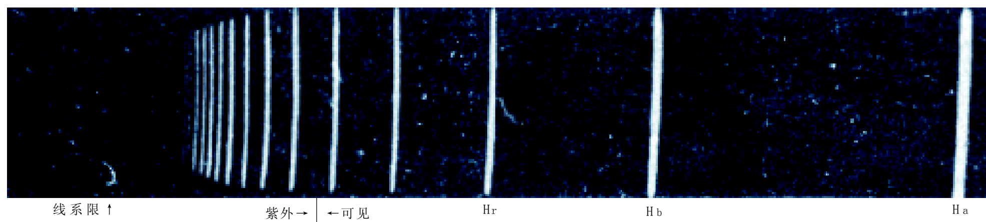


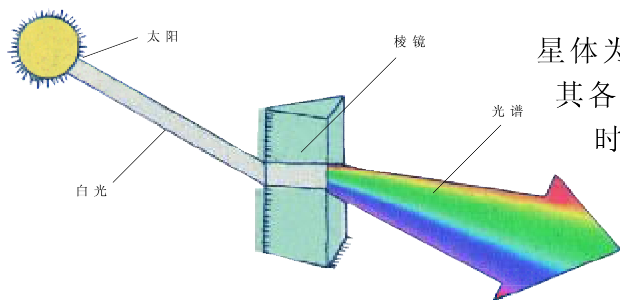
凹透镜与凸透镜的成像　示意图

凸透镜可在镜面后方产生物体的实像，影像较实体本身小且为倒立的。凹透镜会产生虚像，该虚像位于凹透镜与物体之间，且无法投射成像于镜面上。虚像本身为正立且较等大物体的实像小。大部分的光学仪器会同时使用凹透镜与凸透镜以产生清楚的正立影像。

巴耳末系　示意图

巴耳末系是后人根据巴耳末公式所表达的一组谱线，谱线均落在可见光区域。1885 年，巴耳末将前人观察到的14 条氢光谱线进行分析研究后提出一个经验公式——巴耳末公式，根据公式可以计算出光区域谱线的波数。





光的散射　　合成图片

折射是重要的光现象，是理解透镜作用的基础，同时又是理解日常生活中许多光现象的基础。透镜是照相机、幻灯机等光学仪器最重要的组成部分。

星体为其邻近的黑暗邻居所遮蔽时，其各色光线的最小发射值就不会同时被观测到。荷兰天文学家德西特通过对双星的观察，也以相似的理由指出，发光物体的运动速度并不为光的传播速度所依赖。而这一假定，即关于光的传播速度与其“在空间中”的传播方向有关，就其本身而言也是不可能成立的。

简而言之，我们可以假定关于光在真空中的速度 c 是恒定的，这一简单的定律已为学校里的孩童所确信。但谁会想到这个简单的定律竟会使逻辑思维周密的物理学家遇到极大的困难呢？现在，让我们来看看这





惠更斯　　油画

惠更斯是荷兰数学家、物理学家，出生于海牙，但从1666年起长期在法国科学院任职。他生前名重一时的著作是《钟表的振动》，其中包括了他对摆线及其等时性的研究。

家墨子在《墨经》中记载了许多光学现象和成像规律，比如投影、小孔成像、平面镜、凸面镜、凹面镜等等。西方的光学记载也比较早，欧几里得在《反射光学》中研究了光的反射，阿拉伯学者阿勒·哈增也在《光学全书》中讨论了许多光学现象。

光学真正形成一门学科，是在反射定律和折射定律建立之后。这两个定律奠定了几何光学的基础。

牛顿的微粒说　对于光的本质，经典物理学的奠基者牛顿基本上是主张微粒说的。他根据光的直线传播性质，提出光是微粒流的理论。他认为，这些微粒从光源飞出来，在真空或均匀物质内由于惯性而做匀速直线运动；认为光线可能是由球形的物体所组成，并用这种观点解释了光的直线传播和光的反射、折射定律。“牛顿环”现象是牛顿的一项重要发现。当他把一个平凸透镜放在一个双凸透镜上时，观察到一系列明暗相间的同心环。牛顿用他的微粒说解释了牛顿环现象。

惠更斯的波动说　大约与牛顿在英国强调微粒说的同时，荷兰物理

些困难产生的原因。

牛顿的光色理论　示意图

“白光本身是由折射程度不同的各种彩色光所组成的非均匀的混合体。”这就是牛顿的光色理论。它是通过实验建立起来的。这个理论在近代物理学史上具有重要的意义。

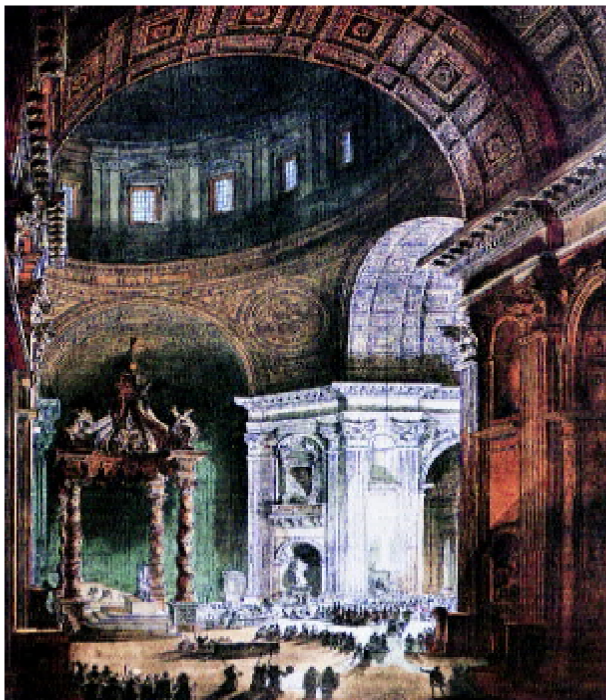


当然，涉及到光的传播过程（对于所有其他的过程而言确实也都应如此），我们必须参照一个刚体（坐标系）来描述。我们再次选取路基作为参考系，不过路基的空气我们假设已经被抽空。如果一道光线沿着路基发出，根据上面的论述，光线的前端相对于路基是以速度 c 传播的。如果车厢仍然以速度 v 在路轨上行驶，其前行的方向与光线传播的方向相同，不过速度要比光速小得多。这条光线相对于车厢的传播速度即是我们需要研究的问题。前一节的推论显然在这里可以适用，因为光线在这里便是相对于车厢走动的人。人相对于路基的速度 W 由光相对于路基的速度代替，w 是所求的光相对于车厢的速度，于是得到：

学家惠更斯在欧洲大陆发展了“波动说”。惠更斯于1678年向法国科学院提交了《光论》这本著作，以批驳牛顿的微粒说，同时提出了他的波动说。他认为，光是由发光体的微小粒子的振动在充满于宇宙空间的媒质“以太”中的一种传播过程，光的传播方式与声音的传播方式一样。惠更斯认为，光是一种波，这一波以非常大但又是以有限的速度在以太中传播。惠更斯由此断言，新的波前在被光所触及的每个颗粒周围产生，并以半球形式散布开来；产生于单一的点的单一波前是无限微弱的，不产生光，但无限多的这种波前重叠的地方就产生了光。这就是惠更斯原理。

光波　合成图片

惠更斯认为光是由发光体的微小粒子的振动在充满于四周空间的媒质“以太”中的一种传播过程，这样我们才能看见光。

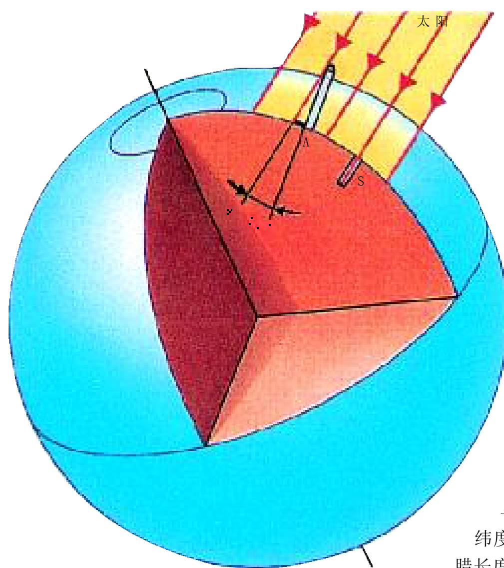


两种学说都可从理论

$w=c-v$

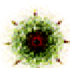
于是光线相对于车厢的传播速度就出现了小于的情况。

但是该结果与本章第五节的相对性原理相抵触。因为就像所有其他普遍的自然界定律一样，真空中光的传播定律，作为参考物体的



厄拉多塞测量地球的周长　示意图

厄拉多塞是第一个测量地球周长的人，其所用方法之简单和测量成果之精确均令人惊叹。在阿斯旺，夏至日中午的阳光直射地面，没有一点影子，连井底都被照亮，这是因为此刻太阳正处于天顶。同日同时，在阿斯旺北部的亚历山卓（A），一座方尖碑的影子说明太阳与天顶的角度为7°左右。这个角度代表了两座城市之间的纬度之差。而两座城市之间的丈量距离为5 000斯达德（古希腊长度单位，约合180米）。



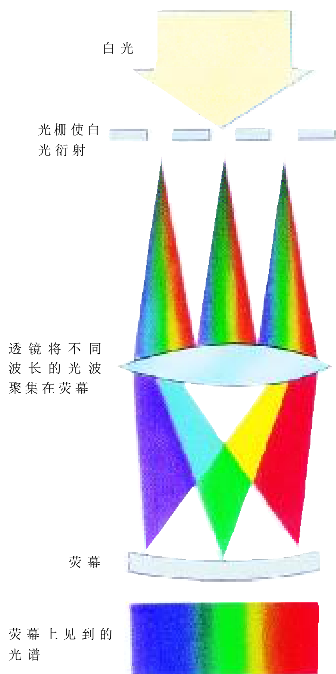
中导出光的反射和折射定律，但说法不一。牛顿说，当光从一种介质进入另一种密度较大的介质时，例如光从空气进入水中，由于光的微粒受到引力的作用，光速会加快。惠更斯则从波的性质考虑，认为光速会减慢。由于牛顿在学术界的巨大声望，波动说在当时不受重视。

随着光学研究的深入，人们逐渐发现许多不能用直进性解释的现象，例如干涉、衍射等，用光的波动性就很容易解释。1801年，英国学者杨格（1773～1829年）做了一个著名的光学实验。他首先将单色光通过一条狭缝，再照射到两条非常靠近的狭缝，结果射出后的光并不沿直线前进，而是散开，在稍远处的光屏上形成亮暗相间的条纹。这是“波”特有的性质，即“干涉现象”。杨格实验显示光具有波动性质，牛顿的粒子说开始动摇。

1850年，两位法国人菲左（1819~1896年）和佛科（1819~1868年），分别通过独立的实验，精确地测出光速，发现光在水中的速率比在空气中慢。牛顿“粒子说”的预测被推翻。惠更斯的“波动说”获得实验的支持，获得空前胜利，

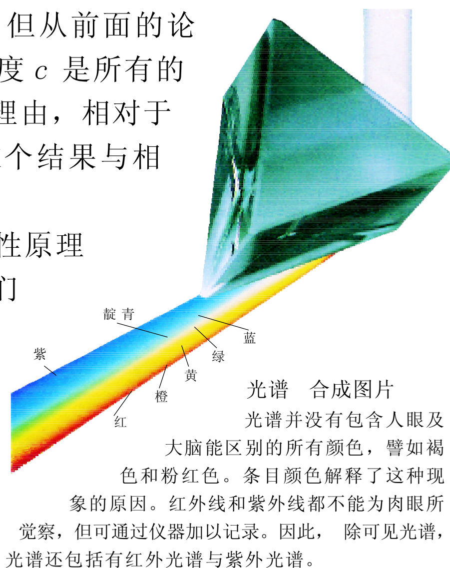
白光的衍射　合成图片

用白光进行干涉实验，各种单色光在光屏中央均为明纹，中央亮纹是各色光复合而成，所以是白色的。各色光由于波长不同，在光屏上产生的其他各级亮纹的位置均不相同，所以其他各级亮纹是彩色的。



不论车厢还是路轨，都必须是一样的。但从前面的论述看来，这一点似乎不可成立。如果速度 c 是所有的光线相对于路基的速度，那么由于这个理由，相对于车厢传播的光就必然服从另一定律。这个结果与相对性原理相抵触。

在此种抵触下，似乎除了放弃相对性原理或真空中光的传播的简单定律外，我们别无他法。但保留相对性原理是仔细阅读上述论述的读者几乎一致的意见。这是因为如此自然而简单的相对性原理给予人们很大的说服力，因而真空中光的传播定律就必须由一个能与相对性原理一致的比较复杂的定律



光谱 合成图片

光谱并没有包含人眼及大脑能区别的所有颜色，譬如褐色和粉红色。条目颜色解释了这种现象的原因。红外线和紫外线都不能为肉眼所觉察，但可通过仪器加以记录。因此， 除可见光谱，光谱还包括有红外光谱与紫外光谱。

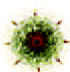
转居上风。“粒子说”几乎全盘被否定。

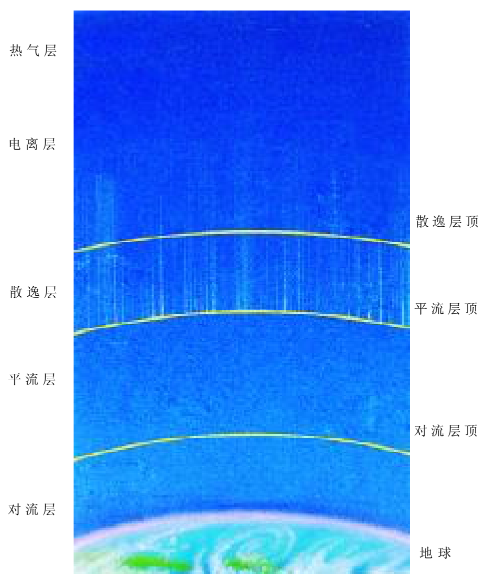
1859 年，德国人克希荷夫（1824~1887 年）和本生（1811~1899 年）发现，每一种化学元素在气体状态时，都有其特定的明线光谱结构。因此光谱可用于精密分析物质的组成成分。由太阳光谱的暗线位置，可判知太阳大气层含有哪些元素。可是他俩并没有追究到原子内部结构和光谱线之间

格林威治大学 摄影

英国格林威治大学是一所皇家国立大学，1890 年建校，是英国第二老的科技大学，是英国三明治课程的创始者。它 1969 年吃下汉莫大学，1976 年吃下大佛学院，1980 年代并吞了艾唯大学、哥耐大学、史密斯学院及伦敦市科大，1992 年受英国皇家册封为完全综合研究大学。在 20 世纪 90 年代，本校学生人数激增至 2 万多人，再度并吞泰晤士健康学院及英国自然资源研究学院，并同时设立新校园于美维及格林威治海岸。今日的格林威治大学是一所拥有古迹格林威治村及超现代新建筑的混合大学。







所取代。然而，理论物理学的发展使我们不必继续这个进程。经典电子论的创立者、具有划时代意义的H.A.洛伦兹对于与运动物体相关的电动力学和光学现象的理论研究表明，他在这个领域中无可争辩的经验产生出关于电磁现象的一个理论，而又由该理论

大气层结构　示意图

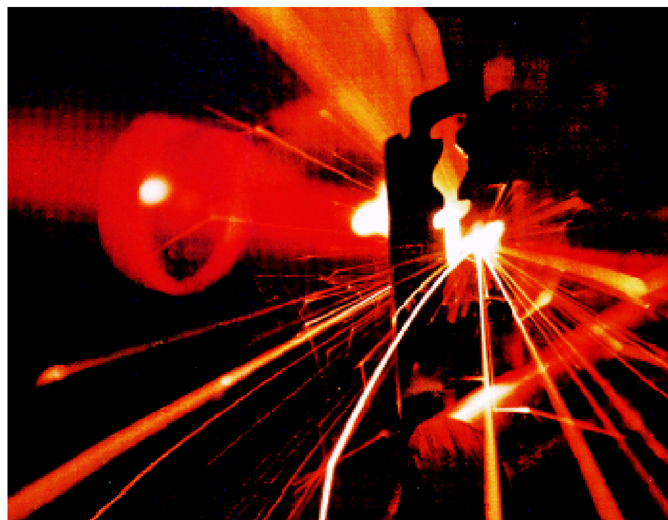
大气层又叫大气圈，地球就被这一层很厚的大气层包围着。大气层的成分主要有氮气，占78.1%；氧气占20.9%；氩气占0.93%；还有少量的二氧化碳、氦气、氖气、氪气、氙气和水蒸气。大气层的空气密度随高度而减小，越高空气越稀薄。大气层的厚度大约在1　000千米以上，但没有明显的界限。整个大气层随高度不同表现出不同的特点，分为对流层、平流层和散逸层，再上面就是星际空间了。

的关系。

20世纪初，科学家又发现光线在投到某些金属表面时，会使金属表面释放电子，这种现象被称为“光电效应”。同时发现，光电子的发射率，与照射到金属表面的光线强度成正比。但是如果用不同波长的光照射金属表面时，照射光的波长增加到一定限度时，既使照射光的强度再强也无法从金属表面释放出电子。这是无法用波动说解释的，因为根据波动说，在光波的照射下，金属中的电子随着光波而振荡，电子振荡的振幅也随着光波振幅的增强而加大，或者说振荡电子的能量与光波的振幅成正比。光越强振幅也越大，只要有足够强的光，就可以使电子的振幅加大到足以摆脱金属原子的束缚而释放出来，

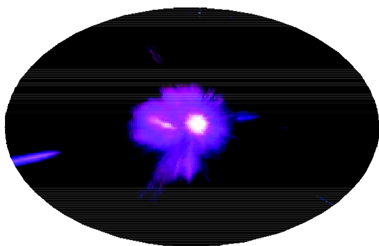
激光　合成图片

1960年一种神奇的光诞生了，它就是激光。激光的英文名称是 Laser，它是英语短语“受激发射光放大”中每个实词第一个字母组成的缩略词，它包含了激光产生的由来。激光的方向性极好，在传播中始终像一条笔直的线，不易发散，光强也可以保证。一束激光射出20 千米远，光斑只有杯口那么大。



宇宙射线　合成图片

宇宙线主要是由质子、氦核、铁核等裸原子核组成的高能粒子流，也含有中性的 γ 射线和能穿过地球的中微子流。它们在星际银河和太阳磁场中得到加速和调制，其中一些最终穿过大气层到达地球。人类对宇宙射线作微观世界的研究过程中采用的观测方式主要有三种，即空间观测、地面观测、地下（或水下）观测。



必然推出了真空中光速恒定定律理论。因此，尽管没有任何实验数据表明有与相对性原理相抵触之处，但许多著名的理论物理学家对相对性原理还是比较倾向于舍弃的观点。

相对论就是在这个关头出现的。由于对时间和空间物理概念的分析，相对性原理因而就与光的传播定律没有丝毫抵触之处。如果将这两个定律进行系统地贯彻，就能得到一个逻辑严谨的理论，借以区别于推广了理论的狭义相对论，而对于广义理论，我们将留待以后的时间再去讨论。下面我们叙述的是狭义相对论的基本观念。

因此光电子的释放不应与光的波长有关。但实验结果却违反这种波动说的解释。

爱因斯坦通过光电效应建立了他的光子学说。他认为，光波的能量应该是“量子化”的。辐射能量是由许许多多分立能量元组成，这种能量元称之为“光子”。光子的能量决定于方程

$E=hv$

式中：E= 光子的能量，单位为焦耳；$h=6.624\times10^{-34}$ 焦耳·秒，为普朗克常数；v 为每秒振动数，即频率。

$v=c/\lambda$

式中，c 为光线的速度，λ 为光的波长。

现代的观念认为，光具有微粒与波动的双重性格，这就是“量子力学”的基础。在研究和应用光的知识时，常把它分为“几何光学”和“物理光学”两部分。适应不同的研究对象和实际需要，还建立了不同的分支。如光谱学、发光学、光度学、分子光学、晶体

光的折射原理　示意图

光的折射是指光线在通过疏密不同的介质交[illegible]的现象。如图所示[illegible]，观察[illegible]角的位置往往[illegible]实际位置要[illegible]这就是由[illegible]光的折射。



光学、大气光学、生理光学和主要研究光学仪器设计和光学技术的应用光学等等。



加州理工学院　摄影

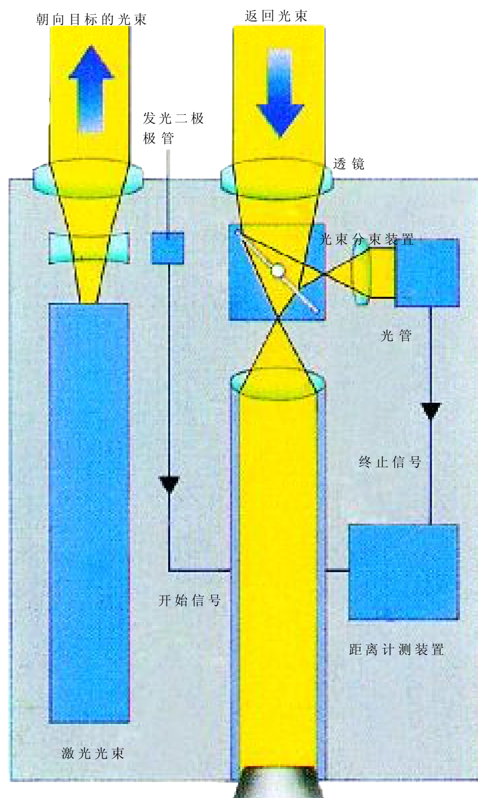
加州理工学院创建于1891年，这所私立大学的宗旨是“为教育事业、政府及工业发展需要培养富有创造力的科学家和工程师”。迄今为止，它已培养了1.7万名学生，其中有22名获得诺贝尔奖，还有大批获得美国政府颁发的各种科学学术奖项。它被誉为美国一流的科技理工类学院当之无愧。

光的传播定律

光的传播定律有三个：光的直线传播定律、反射定律、折射定律。

光的直线传播定律

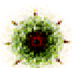
光在均匀媒质中是沿着直线传播的。因此，在点光源（即其线度和它到物体的距离相比很小的光源）的照明下，物体的轮廓和它的影子之间的关系，相当于用直线所作的几何投影。光的直线传播定律是人们从实践中总结出来的。而直线这一概念本身，显然也是由光学的观察而产生的。作为两点间的最短距离是直线这一几何概念，也就是光在均匀媒质中沿着它传播的那条线的概念。所以自古以来，在实验上检查产品的平直程度，均以视线为准。但是，光的直线传播定律并不是在任何情况下都是适用的。如果我们使光通过很小的小孔，则光的传播将不再遵循直线传播定律。如果孔的直径在1/100毫米左右，我们只能看到一个模糊的小孔的像。孔越小，像越模糊。如果孔小于1/2 000毫米时，我们就看不见小孔所成的像了。这是光的波动性





激光测距仪　示意图

激光测距仪是利用激光对目标的距离进行准确测定的仪器。激光测距仪在工作时向目标射出一束很细的激光，由光电元件接收目标反射激光束，计时器测定激光束从发射到接收的时间，计算出从观测者到目标的距离。



造成的。

光的反射定律

光遇到物体或遇到不同介质的交界面（如从空气射入水面）时，光的一部分或全部被表面反射回去，这种现象叫做光的反射。由于反射面的平坦程度，有单向反射及漫反射之分。人能够看到物体正是由于物体能把光“反射”到人的眼睛里，没有光照明物体，人也就无法看到它。

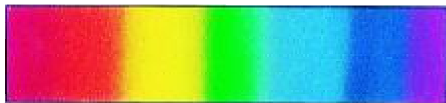


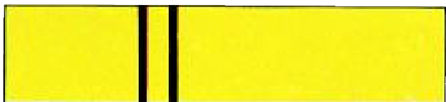
光学望远镜　摄影

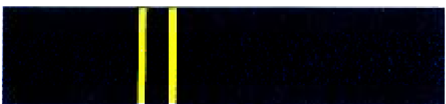
光学望远镜主要分为反向望远镜、折射望远镜和施密特望远镜三类。通过光学望远镜我们可以观测更深层领域的宇宙空间。

光谱　合成图片

光谱是用来鉴别物质、发现新元素和确定它的化学组成的重要依据。光谱分为发射光谱和吸收光谱两大类。物体发光直接产生的光谱叫做发射光谱。



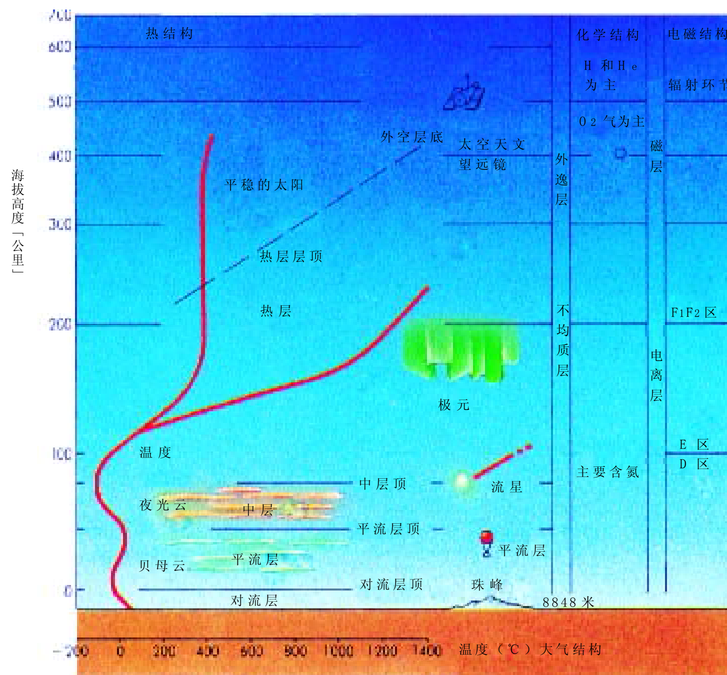




在光的反射过程中所遵守的规律：①入射光线、反射光线与法线（即通过入射点且垂直于入射面的线）同在一平面内，且入射光线和反射光线在法线的两侧；②反射角等于入射角（反射角是法线与反射线的夹角，入射角是入射线与法线的夹角）。在同一条件下，如果光沿原来的反射线的逆方向射到界面上，这时的反射线一定沿原来的入射线的反方向射出。这一点谓之为“光的可逆性”。

漫反射　当一束平行的入射光线射到粗糙的表面时，因面上凹凸不平，所以入射线虽然互相平行，由于各点的法线方向不一致，造成反射光线向不同的方向无规则地反射，这种反射称之为“漫反射”或“漫射”。这种反射的光称为漫射光。很多物体，如植物、墙壁、衣服等，其表面粗看起来似乎是平滑的，但用放大镜仔细观察，就会看到其表面是凹凸不平的，所以本来是平行的太阳光被这些表面反射后，弥漫地射向不同





大气层　合成图片

大气是指包围在地球表面并随地球旋转的空气层。它不仅维持生物体生命所必需，而且参与地球表面的各种过程，如水循环、化学和物理风化、陆地上和海洋中的光合作用及腐败作用等。此外，各种波动、流动和海洋化学也都与大气活动有关。

汤斯　摄影

汤斯（Townes, charles Hard）是美国物理学家。1915年7月28日生于南卡罗来纳州格林维尔，汤斯是一位律师的独生子。1935年他以优等成绩毕业于故乡的福曼大学。他在杜克大学获得硕士学位后去西部深造，于1939年在加利福尼亚理工学院获得博士学位。在第二次世界大战期间以及战后的几年中，他在贝尔实验室从事雷达投弹系统的设计工作。



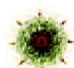
方向。

反射率　又称“反射本领”。是反射光强度与入射光强度的比值。不同材料的表面反射率不同，其数值多以百分数表示。同一材料对不同波长的光可有不同的反射率，这个现象称为“选择反射”。所以，凡列举一材料的反射率均应注明其波长。例如玻璃在可见光的反射率约为4%，锗对波长为4微米红外光的反射率为36%，铝从紫外光到红外光的反射率均可达90%左右，金的选择性很强，在绿光附近的反射率为50%，而在红外光的反射率可达96%以上。此外，反射率还与反射材料周围的介质及光的入射角有关。上面谈及的均是指光在各材料与空气分界面上的反射率，并限于正入射的情况。

光的折射定律

凡光线在通过疏密不同的介质交界面时改变方向的现象，称为光的折射。

光的折射定律，是指在光的折射过程中，确定折射光线方向的定律。它由荷兰科学家斯涅耳（1591~1626年）在1618年首先发现，故称“斯涅耳定律”。一般来说，光从一种媒质射到另一种媒质平滑界面（反射面）

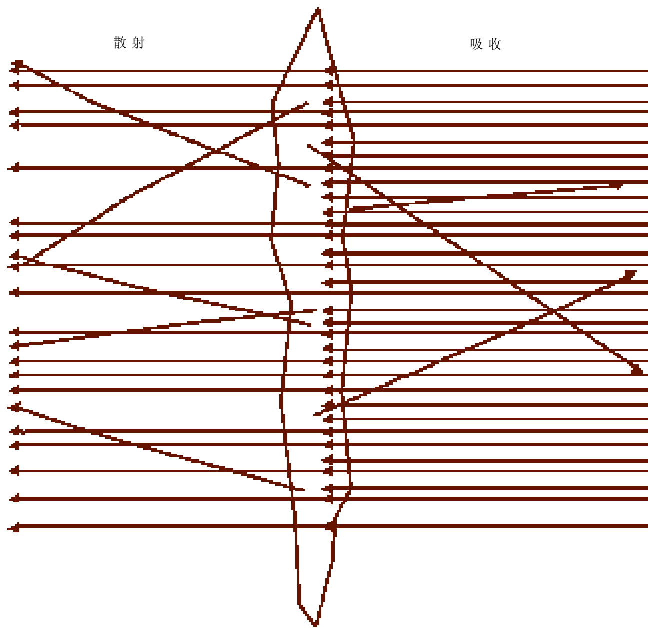


时，一部分将被界面所反射，另一部分将进入界面而在另一媒质中发生折射。折射定律指出：①折射（光）线位于入射（光）线和法线所决定的平面内，折射线和入射线分别位于法线的两侧；②入射角的正弦和折射角的正弦的比值，对于一定的两种媒质来说是一个常数，这常数称为“第二媒质对第一媒质的相对折射率”，并等于第一媒质中的光速与第二媒质中的光速之比值。任一媒质对真空（作为第一媒质）的折射率称为这媒质的“绝对折射率”，简称“折射率”。是几何光学基本定律之一。



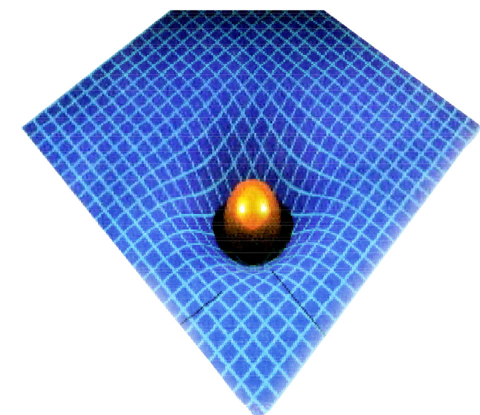
光线由稀的介质入射到密的介质时，折射线常向法线偏向，故折射角常比入射角小；若由密的介质透入稀的介质时，折射线常远离法线，折射角常比入射角大。当光线通过介质的密度在不断变化时，光线前进的方向也随之而改变，因此我们隔着火盆上的热空气看对面的东西时，会觉得那东西不停地在闪动着。这是由于火盆上面的空气因受热很快地上升，这部分空气的密度便和周围空气的密度不同，而且热度还不断在变化，当由物体射来的光线通过这样的空气，其折射光线的路径不断发生变化，就会使物体变成了闪动的形状。

在炎夏中午时分，假使躺在地上来看树木、房屋和人物，它们的轮廓好像是透过一层流动的水一样，而且动摇不定。这是因为那时十分炎热，地面的辐射热很多，温度高，接近地面的空气受热，密度变小，因而上升，成为向上流动的气流，由物体射来的光线通过这种变动着的气流折射光线的路径就不断改变，因此所看到的物体都动摇不定。我们在夜里看到天空中恒星的闪动，也是这个道理。大气里经常存在着密度不同的气流和漩涡，当恒星的光线通过这种气流时，就会使它原来折射的路径发生变化，一会儿到左，一会儿到右。恒星是不会闪动的，都是这折射光造成的。



光的散射　示意图

光束通过不均匀媒质时，部分光束将偏离原来方向而分散传播，从侧向也可以看到光的现象，叫做光的散射。引起光散射的原因是由于媒质中存在着其他物质的微粒，或者媒质本身密度的不均匀性(即密度涨落)。



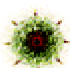
时间和空间　合成图片

现在时间和空间被认为每个单独粒子或者是行星的动力量，根据它的位置和运动状态而具有自己唯一的时间测量。

1.8 物理学的时间观

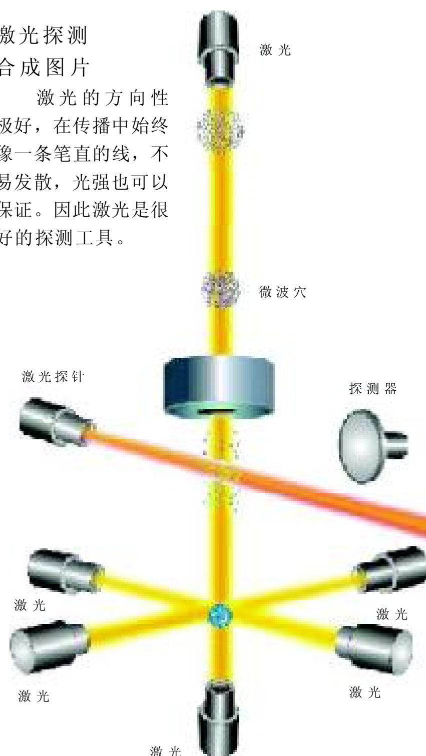
在铁路路基上，雷电击中了铁轨上彼此相距相当远的两处A 点和B 点，当然，这两处的雷电闪光是同时发生的。如果我问你这句话有无意义，你会很肯定地回答说“有”。但是，如果我现在请你解释一下这句话的意义，那么你就会发现在考虑之后回答这个问题并不像最初想象的那么容易。

经过若干时间思考的你或许会



附：

物理学中的时间



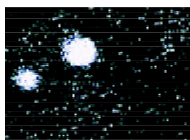
激光探测
合成图片

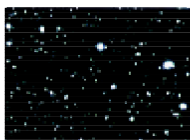
激光的方向性极好，在传播中始终像一条笔直的线，不易发散，光强也可以保证。因此激光是很好的探测工具。

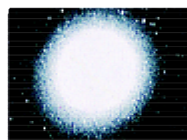
度量两个时刻之间的间隔长短的物理量叫做“时间”。它表征物质运动过程的持续性和顺序性。任何一种周期运动的周期都可作为时间标准，如中国古代的水漏、十二地支（子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥）都是利用周期性的计时方法计时的例子。

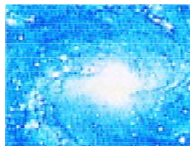
时间是物理学中一个基本的物理量。一段时间在时间坐标轴上用一线段表示。为了用具体数字说明时间，必须选择某一时刻作为计时起点，这是人为的。计时起点不一定是物体开始运动的时刻。在物理学中，将太阳连续两次经过观察者所在的子午线的时间称为一个太阳日，即一昼夜。因太阳日略有差异，取一年中所有太阳日的平均值作为时间的标准，称为一个平均太阳日，简称1 日。1 日分为24 小时，

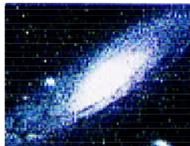
这样回答："这句话的意思本来就很清楚，没有必要再加以解释。当然，如果用观测的方法来判断这两件事在实际情况中是否同时发生，我仍然需要考虑考虑。"这样的答案不能使我感


（A ）最远的类星射电源
120 亿～160 亿光年

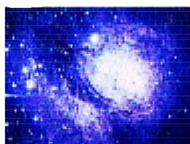

（B ）英/ 山座星系星云
2.5 亿光年

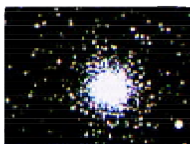

（C ）M87 星系
5 000 万光年

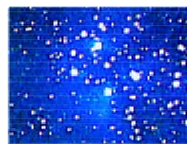

（D ）M83 星系
1 000 万光年


（E ）31 星系
220 万光年


（F ）麦哲伦大星云
17 万光年


（G ）Lagune 星云
4.5 万光年


（H ）M15 球状星团
4 万光年


（I ）昴星（七星）星团
400 光年

在宇宙中旅行　合成图片

科学家利用光速来测量天体之间的距离，星球越远，光到达地球的时间越长。透过天文仪器我们可以进入空间，同时也就追溯到过去的时间。图为宇宙各天体物质与地球之间的距离。

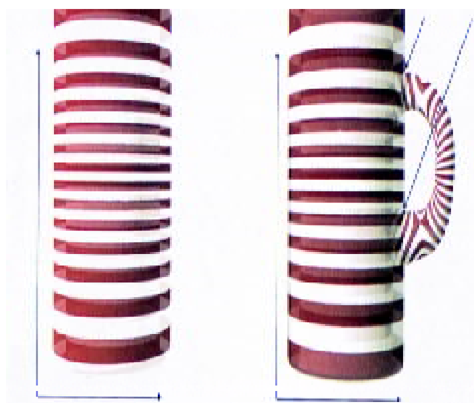
1 小时分为 60 分，1 分又分为 60 秒，于是规定 1 日的 1/86 400 为 1 秒作时间标准。但是这样规定的秒是不精确的。1967 年，第 13 届国际计量大会规定，以基态铯 - 133 原子的两超精细结构能级之间的辐射周期的 91 926 317 700 倍为 1 标准秒。时间常跟位移或平均速度相对应，例如："五秒钟内所发生的位移"或"头两秒内的平均速度"。

时刻　把短暂到几乎接近于零的时间叫即时，即时表示时刻。时刻与时间不同。例如，事件发生在什么时刻？事件持续了多长时间？这是两个不同的概念，应区别前几秒末、后几秒初、第几秒末、第几秒初等等时刻的概念，以及前几秒、

斯坦福大学　摄影

斯坦福大学位于加利福尼亚州的斯坦福市，是由参议员利兰·斯坦福和夫人为了纪念他们正值青春年少时去世的儿子小利兰而于 1885 年创立的，原名"利兰·斯坦福初级大学"。该校效仿欧洲名牌大学的教育模式，立足于使学生获得广泛的自由人应受的教育和实用教育，注重开发学生的想象力和发展他们的个性，使学生的智力和个性都得到良好的发展。

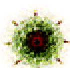




射电望远镜　　摄影

射电望远镜是探测天体射电辐射的基本设备。它可以测量天体射电的强度、频谱及偏振等量，通常由天线 、接收机和终端设备三部分构成。通过它，我们可以探测到太空中的一些星系。

到满意。假如有一位能干的气象学家经过巧妙的思考，发现闪电总能同时击中A处和B处，我们就将面临必须检验理论结果是否与实际相符的任务，同时在一切物理陈述中含有“同时发生”概念的地方，我们都将遇到同样的困难。对于物理学家而言，一个概念能否成立，取决于该概念在实际情况中是否能够被真正满足。因此我们需要有必须能提供一个方法的同时性定义，该方法能使物理学家可以通过实验来确定那两处是否真正同时发生了雷击。在



闪电　　合成图片

闪电是云与云之间、云与地之间和云体内各部位之间的强烈放电。最常见的闪电是线形闪电，它是一些非常明亮的白色、粉红色或淡蓝色的亮线，很像地图上的一条分支很多的河流，又好像悬挂在天空中的一棵蜿蜒曲折、枝杈纵横的大树。线形闪电的“脾气”早已被科学工作者摸透，用连续高速的照相机可以完整地记录线形闪电的全过程，并能在实验室成功地进行模拟实验。除了线形闪电，另外还有球形闪电和链形闪电，这两种闪电都比较少见。



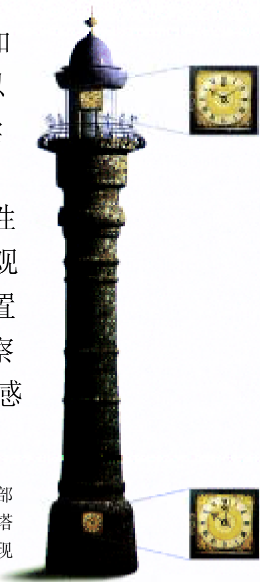
后几秒、几秒内、第几秒等等时间的概念。用一根无限长的只表示先后次序不表示方向的带箭头的线来描述时间和时刻，这条带箭头的线叫做时间轴。时间轴上的每一个点表示一个时刻。时刻衡量一切物质运动的先后顺序，它没有长短，只有先后，它是一个序数。时间轴上相应两个时刻之间的间隔长短，表示一段时间，时间是一个只有长短，而没有方向的物理量。时间具有连续性、单向性、序列性，并且总是不断向前流逝。

世界时　地球自转运动是个相当不错的天然时钟，以它为基础可以建立一个很好的时间计量系统。地球自转的角度可用地方子午线相对于天球上的基本参考点的运动来度量。为了测定地球自转，人们在天球上选取了两个基本参考点：春

此要求没有得到满足前，作为一个物理学家（当然，如果我不是物理学家也是一样。），认为能够赋予同时性以意义，这就是自欺欺人（请读者清楚这一点后再继续读下去）。

在经过一段时间的思考后，你提出了检验同时性的建议，先测量铁轨，量出线路AB的长度，然后将观察者安置在距离AB的中点M，观察者应该有一种装置（例如，相互成90°的两面镜子），使他的视觉既能观察到A处又能观察到B处。如果这位观察者能同一时刻感觉到这两道闪光，那么这两道闪光必定是同时的。

我很高兴你能提出这个建议，但是虽然如此我却不认为已



钟塔　合成图片

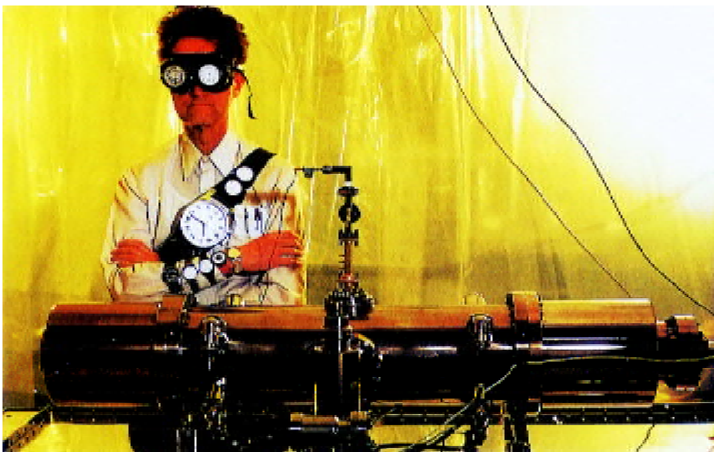
人们发现安置在钟塔底部更靠近地面的钟表比安放在塔顶的钟表走得要慢些，这种现象和广义相对论完全一致。

分点和平太阳点，以此确定的时间分别称为“恒星时”和“平太阳时”。恒星时虽然与地球自转的角度相对应，符合以地球自转运动为基础的时间计量标准的要求，但不能满足日常生活和应用的需要。人们习惯上是以太阳在天球上的位置来确定时间的，但因为地球绕太阳公转运动的轨道是椭圆，所以真太阳周日视运动的速度是不均匀的（即真太阳时是不均匀的）。为了得到以真太阳周日视运动为基础而又克服其不均匀性的时间计量系统，人们引进了一个假想的参考点：平太阳。它在天赤道上做匀速运动，其速度与真太阳的平均速度相一致。

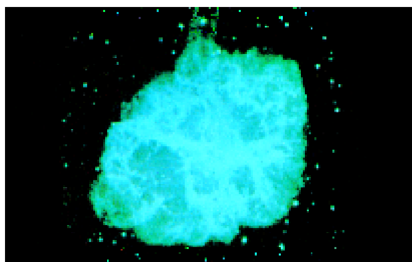
平太阳时的基本单位是平太阳日，1平太阳日等于24平太阳小时，86 400平太阳秒。以平子夜作为0时开始的格林

铯钟管理人　合成图片

铯钟又叫“铯原子钟”。它利用铯原子内部的电子在两个能级之间跳越时辐射出来的电磁波作为标准，去控制校准电子振荡器，进而控制钟的走动，这种钟的稳定程度很高，目前最好的铯原子钟达到500万年才相差1秒。现在国际上，普遍采用铯原子钟的跃迁频率作为时间频率的标准，广泛应用在天文、大地测量和国防建设等各个领域中。



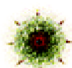
完全解决了该问题，因为我仍有一些不同的意见。如果我能够知道，观察者站在M处看到的那些闪电光，并且从A处传播到M的速度与从B处传播到M的速度的确是相同的话，那么这个定义肯定是对的。但是，假定的方法必须要进行验证，而对于该定义的验证，我们需要有掌握测量时间的方法才存在可能。因而我们目前好像尽围绕这个逻辑在兜圈子。



原子　合成图片

“原子”一词由希腊语“不可分”衍化而来，它是元素能够存在的最小单位，是化学变化中的最小微粒。原子是由原子核和核外电子组成的。原子核由质子和中子组成。

经过更深层次的考虑后，你带着无可非议、有些轻蔑的眼光瞥我一眼，并宣称：“我将仍然坚持我先前的定义，这个定义在实际上完全没有对光作过任何假定。同时性定义的要求只有一个，即在每一实际情况中，它必须要为我们的实验所提供一个方

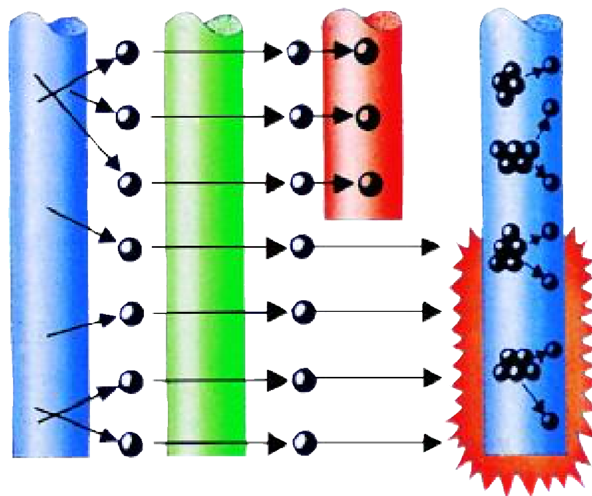


威治平太阳时，就称为世界时，简称UT。世界时与恒星时有严格的转换关系，人们是通过观测恒星得到世界时的。后来发现，由于地极移动和地球自转的不均匀性，最初得到的世界时，记为UT_0，也是不均匀的。人们对UT_0加上极移改正得到UT_1，如果再加上地球自转速率季节性变化的经验改正就得到UT_2。

20世纪60年代以前，世界时作为基本时间计量系统被广泛应用，因为它与地球自转的角度有关，所以即使出现了更为均匀的原子时系统，世界时对于日常生活、大地测量、天文导航及其他有关地球的科学仍是必需的。

原子反应堆　示意图

核反应堆，又称为原子反应堆或反应堆，是装配了核燃料以实现大规模可控制裂变链式反应的装置。

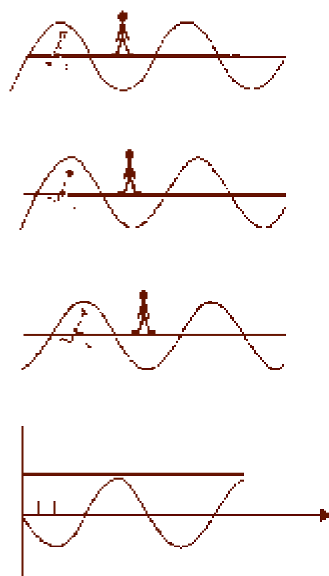


时间的测量

时间描述事件的次序。可以选定某种周期性重复的运动过程作为参考标准，把其他物质的运动过程与这个选定的运动过程进行比较，判别和排列各个事件发生的先后顺序及运动的快慢程度。

法，这个方法能判断该定义所规定的概念是否能被满足。很明显的是，我的定义已经满足了这个要求，这是无可争辩的事实。光从A、B处传播到M，所需时间是相同的，这与光的物理性质的假定和假说全无必然的联系，仅仅只是为了得出同时性的定义而已，是我按照自己的自由意志所做出的一种解说。”

这个定义是很清楚的，它能对两个或多个我们选定的任意事件的同时性规定出一个确切的意义，而与事件相对于参考物体（在此是铁



电磁波　示意图

电磁波是电磁场的一种运动形态。电可以生成磁，磁也能带来电，变化的电场和变化的磁场构成了一个不可分离的统一的场，这就是电磁场，而变化的电磁场在空间的传播形成了电磁波，所以电磁波也常称为电波。

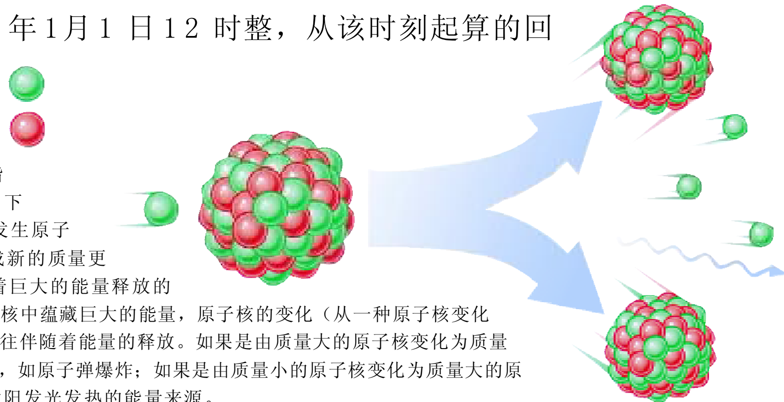
通常所说的时间测量包括既有差别又有联系的两个内容：时间间隔的测量和时刻的测量。物理学所关心的主要是时间间隔的测量及与其在数学上用倒数关系相联系的频率测量，一般统称时间频率计量。

时间的单位是秒。随着科学技术的发展，秒的定义曾做过两次重大的修改。

最早，人们是利用地球自转运动来计量时间的，基本单位是平太阳日。19世纪末，将一个平太阳日的1/86 400作为1秒，称作世界时秒。

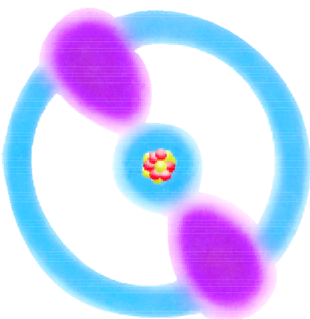
由于地球的自转运动存在着不规则变化，并有长期减慢的趋势，使得世界时秒逐年变化，不能保持恒定。按此定义，秒的准确度只能达到亿分之一秒。

1960年国际计量大会决定采用以地球公转的运动为基础的历书时秒作为时间单位，即将1900年初，太阳的几何平黄经为279° 41′8″.04的瞬间作为1900年1月1日12时整，从该时刻起算的回



核聚变　示意图

核聚变是指由质量小的原子，主要是指氘或氚，在一定条件下（如超高温和高压），发生原子核互相聚合作用，生成新的质量更大的原子核，并伴随着巨大的能量释放的一种核反应形式。原子核中蕴藏巨大的能量，原子核的变化（从一种原子核变化为另外一种原子核）往往伴随着能量的释放。如果是由质量大的原子核变化为质量小的原子核，叫核裂变，如原子弹爆炸；如果是由质量小的原子核变化为质量大的原子核，叫核聚变，如太阳发光发热的能量来源。

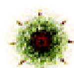


碳原子　合成图片

碳原子最外层有四个电子，在有机化合物中，每个碳原子不仅能与其他原子形成四个共价键，而且碳原子与碳原子之间也能相互形成共价键，不仅可以形成单键，还可以形成双键或三键；多个碳原子可以相互结合形成长长的碳链，也可以形成碳环。因此一个有机物的分子可能只含一个碳原子，也可能含有几千甚至上万个碳原子，而含有相同原子种类和数目的分子又可能具有不同的结构。这是造成碳的化合物种类和数目繁多的主要原因。

路路基）的位置无关，我们因而也可以得出物理学的“时间”定义。为此，我们假定同一结构的钟放在铁路线（坐标系）上的 A、B 和 C 诸点上，并使它们的指针同时（按照上述意义来理解）指着相同的位置。在这些条件下，我们把一个事件的“时间”理解力放在该事件的（空间）最邻近的那个钟的读数（指针所指位置）上。照这样看来，每一个本质上的时间值都与可以观测到的事件有联系。

如果没有相反的实验证据的话，这个规定所包含的另一物理假说很



归年的1/31 556 925.974 7 作为1秒。按此定义，秒的准确度提高到十亿分之一秒。

1967 年，国际计量大会决定采用原子秒定义取代历书时秒定义。即将铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁相对应辐射的91926317700个周期所持续的时间定义为1秒。按此定义，秒的准确度已优于十万亿分之一秒。

原子在发生能级跃迁时以电磁波形式辐射或吸收能量，该电磁波的频率和周期精确地与原子的微观结构相对应，所以极为稳定。人们利用这一特性制成了各种各样性能优异的原子钟。

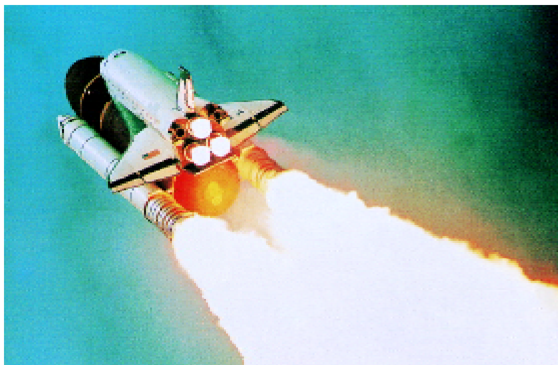
实验室型的铯束原子钟是复现原

布朗大学　摄影

布朗大学是一所私立、男女同校的综合性大学，创建于1764 年。是美国历史上第七所、新英格兰地区第三所最早的大学，常青藤联合会成员之一。布朗大学设有分科精细的众多学院。它的主要学院称为大学学院，其次是医学院。前者是一所文理性质的学院，后者为专业学院。其他的学院都不是实体，如研究生院、韦兰学院等。



少会有人想到。我们已经假定，放在铁路线上的钟的构造完全一样，它们以相同的频率走动。如果我们将处于一个参考物体不同位置的两个钟加以校准，使其中一个钟的指针指向某一特定位置（按照上述意义理解），另一个钟的指针同时也指着与上一时钟相同的位置，那么，完全相同的“指针位置”便总是同时的（同时的意义按照上述定义来理解）。



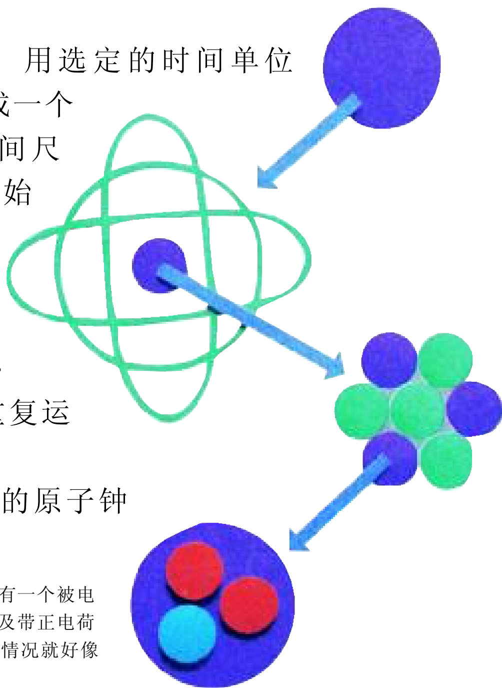
航天飞机　合成图片

航天飞机是可以重复使用的、往返于地球表面和近地轨道之间运送人员和货物的飞行器。它在轨道上运行时，可在机载有效载荷和乘员的配合下完成多种任务。航天飞机通常设计成火箭推进的飞机，返回地面时能像滑翔飞机或飞机那样下滑和着陆。航天飞机为人类自由进出太空提供了很好的工具，是航天史上的一个重要里程碑。

子秒定义的时间频率基准器，具有最高的准确度和长期稳定度。氢原子钟是激射器型的，它的短期稳定度优于铯原子钟，但因受到贮存泡“壁移效应”的限制，准确度比铯原子钟低一个数量级。铷原子钟是气泡型的，结构简单，轻便价廉，虽然准确度不高，但短期稳定度尚好，作为工作标准是很适宜的。此外，人们正在研究利用离子贮存技术和激光稳频技术制造性能更好的原子钟。

用选定的某一瞬间作为原点，用选定的时间单位“秒”进行连续不断的积累，就构成一个时间参照坐标系，叫做时标或时间尺度。时标的原点称做时刻起点或起始历元。某一事件发生的瞬间与时标上某点相对应，此瞬间称做时刻。两个时刻之间的持续时间称做时间间隔。到目前为止，时标不外是基于天文观测或对某些周期性重复运动的测量而获得。

原子时标是由连续不断工作着的原子钟



原子结构发展　示意图

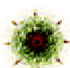
世上所有物质都是由细小的原子组成，而每粒原子有一个被电子包围着的原子核。细小的原子核内含不带电荷的中子及带正电荷的质子，而带负电荷的电子则沿轨道环绕原子核运行，情况就好像行星环绕太阳运行一样。

得到的。对各自独立的原子时标加以平均，可以提高它们的均匀性。国际时间局根据国际单位制时间单位秒的定义，以各国有关研究所运转的原子钟的读数为依据，进行加权平均得到的时间参考坐标叫做“国际原子时”(TA1)，它的起点是1958年1月1日0时0分0秒(UT2)。



密歇根大学　摄影

密歇根大学（University of Michigan）建于1817年，是美国最早、最著名的大学之一和学术重镇，拥有全美最大的研究预算的机构。浓厚的学术气氛，优良的师资，顶尖的商学院、法学院、医学院、工学院，被誉为″公立的常青藤院校″。



高度准确的标准频率和时间信号主要通过无线电波的发射和传播提供给使用部门。按其载波频率可分为超高频、高频、低频和甚低频发播，分别由专用授时台发播或由导航台、电视台、通信卫星等兼任。

由于传输特性不同，所以接收精度、接收范围、接收时间，以及校准设备操纵的难易和经济性各有不同，不同的用户可以根据需要和可能选择使用。



莫特尔森　摄影

莫特尔森（Mottleson, Ben Roy），物理学家。1926年7月9日生于芝加哥。莫特尔森在哈佛大学获得博士学位，又得到一笔资助去了丹麦，在哥本哈根玻尔研究所工作。在该所，他结识了奥戈·玻尔，两人建立了密切的工作关系，这使莫特尔森最后加入了丹麦籍。他和奥戈·玻尔一起研究了原子核的形状，并由于这一工作共同获得了1975年诺贝尔物理学奖。



温伯格　摄影

温伯格从粒子物理观点解释广义相对论的尝试，在超弦理论的框架中有所进展，但是仍然远远没有完成。温伯格坚持这种观点的主要原因，是因为广义相对论和宇宙论中的物理量（如质量和自旋等）几乎全都依赖于狭义相对论。

钟表　合成图片

精密时间是科学研究和实验的基本物理参量，它为一切动力学系统中的测量和定量研究提供了必要的时基坐标。此图中的不同钟表是人类历史发展中所产生的时间测量工具。



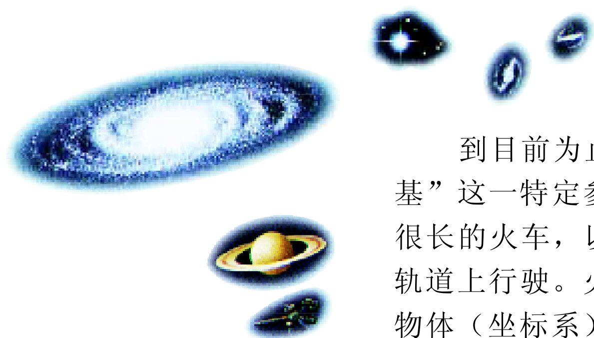
时间应用

精密时间是科学研究、科学实验和工程技术诸方面的基本物理参量。它为一切动力学系统和时序过程的测量和定量研究提供了必不可少的时基坐标。精密时间以其完美的线性和连续性展示出缤纷的客观世界的理性，成为人类认识世界和改造世界的科学锐剑。

精密时间不仅在基础研究领域有重要的作用，如地球自转变化等地球动力学研究、相对论研究、脉冲星周期研究和人造卫星动力学测地等，而且在应用研究、国防和国民经济建设中也有普遍的应用，如航空航天、深空通讯、卫星发射及监控、信息高速公路、地质测绘、导航通信、电力传输和科学计量等，甚至已经深入到人们社会生活的方方面面，几乎无所不及。

随着现代社会的高速发展，对高精度时间频率提出了更高要求，特别是现代数字通信网的发展、信息高速公路建设，各种政治、文化、科技和社会信息的协调都是建立在严格的时间同步基础上的，见下表：

	频率稳定度	**时刻准确度**
卫星导航	±20 纳秒	$\pm 2\times10^{-13}$（日稳）
电子侦察卫星	±10 纳秒	$\pm 5\times10^{-13}$
巡航导弹	±50 纳秒	$\pm 5\times10^{-13}$
卫星测轨	±50 纳秒	$\pm 1\times10^{-12}$
高速数字通信网	±0.5 微秒	$\pm 5\times10^{-12}$
电力传输网	±1 微秒	$\pm 1\times10^{-11}$
电视校频	—	$\pm 5\times10^{-12}$

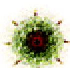


1.9 相对性的同时性

到目前为止，我们的思考一直参照“铁路路基”这一特定参考物体来进行，我们假设有一列很长的火车，以等速度 v 沿下图所标明的方向在轨道上行驶。火车上的乘客把火车当做刚性参考物体（坐标系）来观察一切事物。因而轨道上发生的每一事件也相对于火车的某一特定地点发

天体物理学　合成图片

天体物理学是应用物理学的技术、方法和理论，研究天体的形态、结构、化学组成、物理状态和演化规律的天文学分支学科。从公元前129年古希腊天文学家喜帕恰斯目测恒星光度起，中间经过1609年伽利略使用光学望远镜观测天体，绘制月面图，1655～1656年惠更斯发现土星光环和猎户座星云，后来还有哈雷发现恒星自行，到18世纪老赫歇耳开创恒星天文学，这是天体物理学的孕育时期。19世纪中叶，三种物理方法——分光学、光度学和照相术广泛应用于天体的观测研究以后，对天体的结构、化学组成、物理状态的研究形成了完整的科学体系，天体物理学开始成为天文学的一个独立的分支学科。



附：

同时性

所谓同时，就是两个事件发生的时间间隔 $\Delta t=0$ 。在伽利略变换中，时间与惯性参照系的相对运动无关，即与物质运动无关，$t'=t$ ，故有 $\Delta t'=\Delta t$ ，这表示在一个惯性系中同时发生的事件在任何一个惯性系中都是同时发生的，同时是无条件的、绝对的。经典时空观的这种同时绝对性显然来自时间与物质运动的无关性。所以，在各种经典理论中，经过校准的两个时钟不论置于何地，不论是否发生相对运动，总是同步的，读数总是相同的。

但是，在相对论中，由于时



哥廷根大学　摄影

哥廷根大学自从1980年以来，该大学已经根据不同学科成立了14个分校和系。在这些分校中设有170多个研究所，系主任都是学术会成员。哥廷根大学的校友中有30多人曾获诺贝尔奖。从这里走出的诺贝尔奖得主人数位居世界大学第八位。

生，与相对于路基所作的同时性定义相同，我们也能相对于火车作同时性的定义。但作为一个自然的推论，下面的问题就产生了：

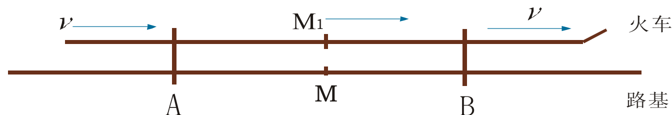


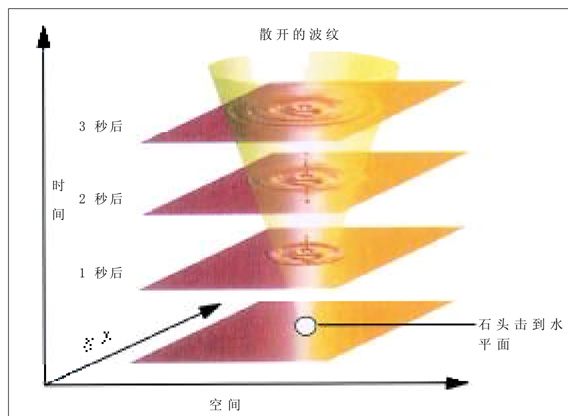
图1

两个事件对于铁路路基来说是同时发生的（例如A、B两处闪击。——译注），对于火车来说也是否是同时发生的呢，我们将立即做出否定的证明。

A、B 两处被闪电击中相对于路基而言是同时的意思是：击中 A 处和 B 处的闪电光，在路基 A → B 的中点 M 相遇。但 A 和 B 也对应于火车上的 A 点和 B 点。令 M_1 为行驶中的火车 A → B 的中点，当闪电光发生时，

涟漪时空图　合成图片

这是在池塘表面上散开的涟漪的时空图。这些扩大的水波圆圈在具有两个空间方向和一个时间方向的时空中画出一个圆锥。

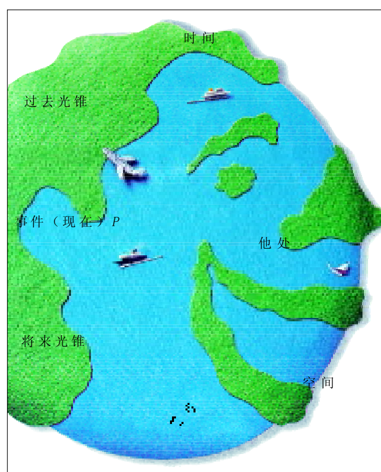


间与惯性参照系之间的相对运动有关，即与物质运动有关，在一个惯性系中同时发生的事件在另一个惯性系中不一定是同时发生的。也就是说，由于

$$t=\frac{t'+\frac{\nu_{x'}}{C^2}}{\sqrt{1-\frac{\nu^2}{C^2}}}$$

$$\Delta t=\frac{\Delta t'+\frac{\nu_{\Delta x'}}{C^2}}{\sqrt{1-\frac{\nu^2}{C^2}}}$$

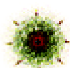
所以，当 $\Delta t'=0$ 时，若 $\Delta x'\neq 0$，则 $\Delta t\neq 0$。可见，相对论中的同时不是绝对的。这显然是由于在相对论中，时间与物质运动有关，时间与空间相互关联。所以，在相对论中研究问题，首先要解决如何使分置两地的时钟同步的问题，即校准的问题。否则，比较时间长短就失去了意义。爱



脉冲轨迹　合成图片

从事件 P 发出的光脉冲的轨迹在时空中形成一个所谓“P 的将来光锥”。与其相类似，“P 的过去光锥”是所有将通过事件 P 的光线的轨迹。这两个光锥把时空分成 P 的过去、将来和他处。

点 M_1 自然与 M 重合，但是火车上的点 M_1 以等速度 v 向右方移动。如果 M_1 处的乘客并没有随火车移动，那么他就停留在 M 点，击中 A 和 B 的闪电光就同时到达他的位置，也就是说恰好在他所在的地方相遇。但是（相对于铁路路基来说）该乘客正在朝来自 B 的光线以等速度 v 行进，同时他又是在与 A 处发出的光线做逆行运动。因此该乘客将先看见自 B 处发出的光，后看见自 A 处发出的光。所以，以列车为参考物的乘客将会得出如下结论，即闪电光 B 先于闪电光 A 发生。于是

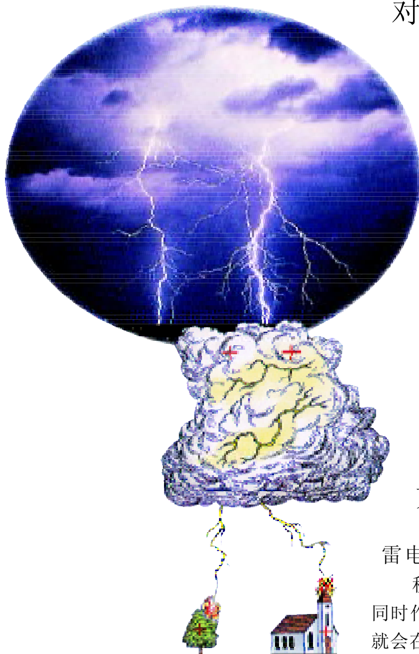


因斯坦校准分置两地的时钟的方法是：在两地连线的中点放置一个光信号发生器，同时向两地发出光信号。由于光速不变，分置两地的两个时钟必定同时收到光信号，从而被校准。

爱因斯坦创立“狭义相对论”是从对同时性的讨论开始的。

爱因斯坦在《狭义相对论的意义》中说，为了完成时间的定义，可以使用真空中光速恒定的原理。假定在 K 系各处放置同样的计时器，相对于 K 保持静止，并按下列安排校准。当某一记时器 U_m 指向时刻 T_m 时，从这只记时器发出光线，在真空中通过距离 R_{mn} 到记时器 U_n；当光线遇着记时器 U_n 的时刻，使记时器 U_n 对准到时刻（$T_n=T_m+R_{mn}/c$）。光速恒定原理于是断定这样校准记时器不会引起矛盾。

同时性有主观的同时性与客观的同时性之分。经典力学关于同时性的说法，是客观的。物质每时每刻都在发生变化，由于信号的传递速度限制，不可能均被我们感知，如太阳光照射到地球，需要八分多钟时间。



雷电的形成　合成图片

积雨云形成过程中，在大气电场以及温差起电效应、破碎起电效应的同时作用下，正负电荷分别在云的不同部位积聚。当电荷积聚到一定程度，就会在云与云之间或云与地之间发生放电，也就是人们平常所说的“雷电”。

射电望远镜　摄影

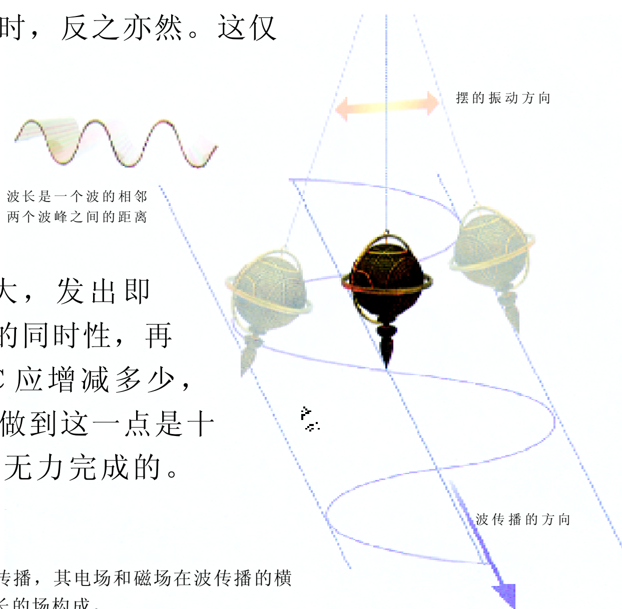
射电望远镜是观测和研究来自天体的射电波的基本设备。它包括：收集射电波的定向天线，放大射电信号的高灵敏度接收机，信息记录、处理和显示系统等等。射电望远镜的基本原理和光学反射望远镜相同，投射来的电磁波被一精确镜面反射后，同相到达公共焦点。用旋转抛物面作镜面易于实现同相聚集。因此，射电望远镜的天线大多是抛物面。



我们感知的，也只是光线传递来的八分多钟以前的太阳的信息，现在太阳什么情况，只有以后才能知道。

主观的同时性表面上没人赞成，实际上远非如此。用光信号作为两点间同时性的校对信号，不失为一个好的办法。但这种办法推广到任意点之间进行同时性的校对，就会出现一种错误情况。

比如A地发射一个光信号给距离不等的B地和C地。那么A地校对时间起始点时，因先后接到两个返回信号，它的起始位置就不能确定：与B同时时就不能与C同时，反之亦然。这仅是三点之间的情况，宇宙中有无穷多点的，用光信号进行同时性校对时，实际上既认为光信号具有有限的传播速度，又默认光的速度是无穷大，发出即至。当然，校对了A与B的同时性，再与C校对时，可以告知C应增减多少，但宇宙中的点有无穷多，做到这一点是十分困难的，可以说是根本无力完成的。



前进的波和振动的摆　合成图片

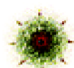
电磁辐射以波的方式通过空间进行传播，其电场和磁场在波传播的横向像摆那样振动，其辐射可以由不同波长的场构成。

我们就得出以下重要结果：

相对于路基是同时的事件，对于火车并不同时，反过来也是如此（同时性的相对性）。每一个参考物体（坐标系）都有自己的特殊时间，除非我们能够明确表述关于时间的相对参考物体，否则这一个事件的时间的陈述就没有任何意义。

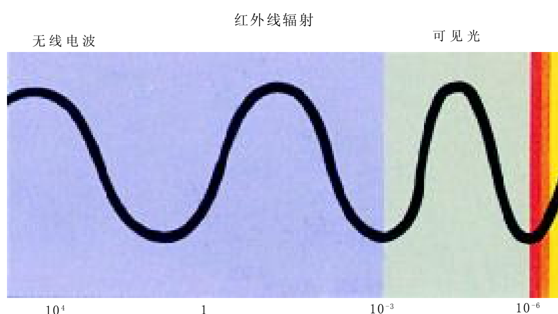
相对论创立前，物理学中存在着时间的陈述具有绝对意义这一隐含假定，也就是时间的陈述与参考物体的运动状态无关。但是刚才的事例表明，该假定与最自然的同时性定义并不相容，如果抛弃这个假定，那么真空中光的传播定律与相对性原理之间的冲突（本章第七节所述）便会消失。

这个冲突是根据本章第六节的论述推论而来，现在这些论点已经不再可维持。在该节我们的结论是：车厢里的乘客如果相对于车厢以每秒 w 的速度行走，那么每秒钟他相对于路基也走了相同的距离。可是按照



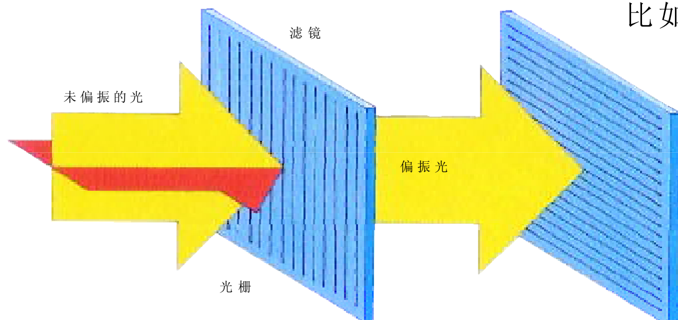
是不是没办法校对同时性呢？也不是。前已分析过，时间仅是物质变化的量度，使用周期信号来记数；时钟也只是一个周期信号，是一个比较基准。所以我们校对同时性时，可以在一点校对多个时钟，然后分别拿到各个观察点去就行了。运动是相对的，被测物体也是可作为观察者的。

另外，我们不能认为物体只有在相互作用时才存在。比如太阳光照到地球上需要



无线电波　示意图

无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的射频频段的电磁波。无线电技术是通过无线电波传播声音或其他信号的技术。　无线电技术的原理在于，导体中电流强弱的改变会产生电波。利用这一现象，通过调制可将信息加载于无线电波之上。当电波通过空间传播到达收信端，电波引起的电磁场变化又会在导体中产生电流。　通过解调将信息从电流变化中提取出来，就达到了信息传递的目的。

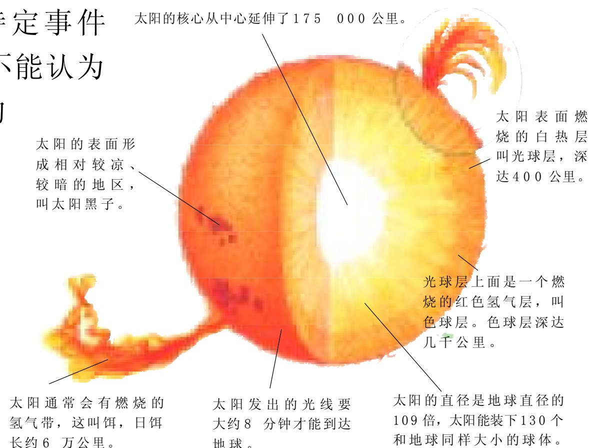


偏振光　合成图片

振动方向对于传播方向的不对称性叫做偏振，它是横波区别于其他纵波的一个最明显的标志，只有横波才有偏振现象。光波是电磁波，因此，光波的传播方向就是电磁波的传播方向。光波中的电振动矢量 E 和磁振动矢量 H 都与传播速度 v 垂直，因此光波是横波，它具有偏振性。

以上论述，当车厢里发生一特定事件时，该事件所需要的时间，绝不能认为与从路基（参考物体）上判断的发生同一事件所需要的时间相等。因此我们不能说在车厢里走动的乘客相对于铁路线走距离 w 所需的时间从路基上判断是相等的。

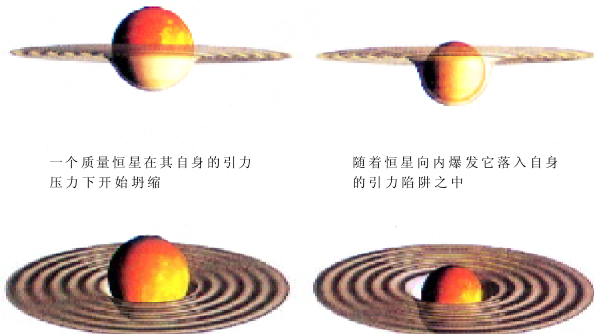
此外，本章第六节的论述还基于相对于严谨的思考来说是任意的一个假定。虽然在相对论创立以前，物理学中一直隐藏着这个假定。



太阳　构成示意图

图片清晰地标明了太阳的构成。

八分多钟，我们不能在自己感知太阳光时，才说太阳存在。太阳的实际位置也不是我们看到的位置。有许多事情我们这一代人是无法得知的，但不能说那种事情不存在。我们的有些感觉掺进了主观的成分，必须经过思维才能了解真情。

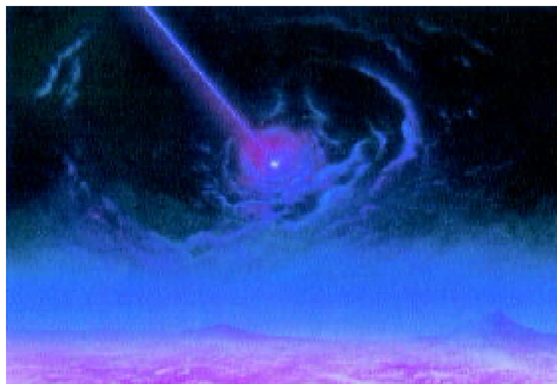


恒星的引力场　合成图片

一个收缩的恒星增长的引力场对周围的效应可以将空间想象成一张敏感的弹性的纸张。物质越重，凹入处就越深。此处见到的最终引力内爆代表黑洞的奇性。

比如，我们感到地面是平的（说海平面更恰当）。可地球是球形，海平面当然只是球面一部分。太阳东升西落，实际是地球自转。这些都只有经过思维，有些还需要经过模拟试验才能得出结论。

“在某个参考系中，同一时间但在不同地点发生的两个事件，在另一个参考系看来，将变成被一定时间间隔分离开来的两个事件。”“在某个参考系中，同一地点但在不同时间发生的两个事件，在另一个参考系看来，会变成被一定空间间隔分离开的两个事件。”这两种说法，用“看来”一词表述，只反映观察者的感觉，并不是事实，而这两种说法却是“狭义相对论”使时间与空间等价且可以互相转换的理论基础。

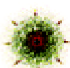


脉冲星　天文摄影

脉冲星被普遍认为是一种中子星——被称为“超新星”的巨大且不停地爆炸着的星体的残余物。图中由于脉冲星在飞快地自转，因此它所放出的一束极细微的电波被当成了脉冲波。

1.10 距离概念的相对性

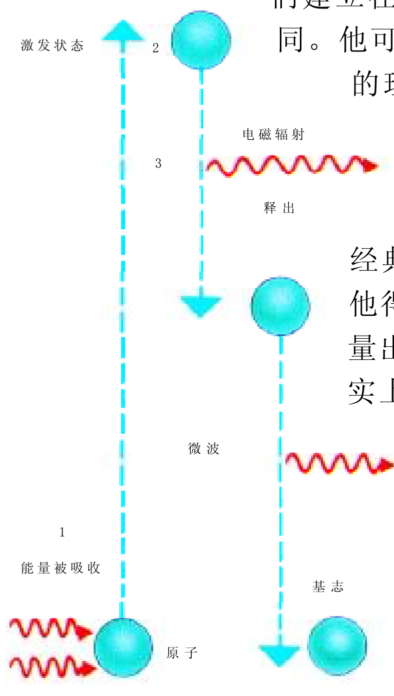
让我们来研究以速度 v 沿铁轨行驶的火车上两个特定的点之间的距离。我们知道，测量一段距离，需要有相对于量出这段距离长度的参考物体。在此例中，最简单的参考物体（坐标系）是火车本身，在火车上的观察者测量两个特定点之间的距离是用量杆沿一条直线（例如车厢



附：

乱弹

在本节中，爱因斯坦并没有用物理语言表达他所理解的距离收缩效应。他提出了从铁路线上判断火车上一段距离的“方法”，这种方法与我们建立在绝对时空观基础上的方法没有什么本质的不同。他可能由于太吝惜笔墨或过高地估计了“普通人”的理解能力，以至于没有清楚地说明如何用本章第八节（“物理学的时间观”）所提出的时间定义来确定“路基上的 A 点和 B 点”，而依某些人的观点，其本章第八节所提出的时间定义与经典物理学的时间定义相比并没有什么新鲜之处。他得出了结论：“在路基上量出的长度与在火车上量出的长度可能会有不同。”这确实没错，因为事实上我们这样测量时有时会测得长些、有时又会



微波放射　示意图

微波——电磁辐射的一种形式，波长范围从 1 毫米左右（可归于红外）到 120 毫米左右（接近于无线电波）。微波的主要特点是它的似光性、穿透性和非电离性。似光性——微波与频率较低的无线电波相比，更能像光线一样地传播和集中；穿透性——与红外线相比，微波照射介质时更容易深入物质内部；非电离性——微波的量子能量与物质相互作用时，不改变物质分子的内部结构。

地板）一步步量，从一给定的点到另一给定的点需要用量杆测量的次数便是我们所求的距离。

从铁轨线上测量这段距离，与火车上的测量相比，完全是不同的，我们可以考虑使用如下方法。如果我们把火车上的两点称为 A_1 和 B_1，那么这两点以速度 v 沿路基移动。首先，我们需要在路基上确定在某一特定时刻，恰好各为由路基判断的 A_1 和 B_1 所通过的两个对应点 A 和 B，路基上的 A 和 B 点可以用本章第八节所提出的时间定义来确定，然后再用量杆沿着路基量取 A、B 两点之间的距离。

以先前的观点来看，我们不能肯定这次的测量结果与第一次的测量结果完全一样。因此，在路基上量出的长度与在火车上量出的长度可能会有不同，这也是我们对本章第六节中表面看来是明白的论述提出的第二个不同意见。即如果车厢里的人在 1 秒钟内走了一段距离 w，那么在路基上的话，这段距离并不一定也等于 w。

测得短些，所以，确实很难看出这个描述具有什么实质意义，即很难看出这个描述与长度收缩效应有什么必然联系。因此，爱因斯坦本人是否能物理地理解长度收缩效应，值得怀疑。

距离的定义

《辞海》（1999 年版）中，“距离”的定义是：①两处相隔；相隔的长度。②几何学的基本概念之一。对不同对象有不同的规定。例如，在欧几里得空间中，两点间的距离是连接这两点的直线段的长。从一点到一直线或一平面的距离是这点向直线或平面所引的垂线段的长；两平行线或平面的距离是指它们间公共垂线段的长。在球面上，两点间的距离是由这两点所确定的大圆的劣弧的长。距离的概念也可以推广到更为一般的数学对象中去。





约瑟夫·约翰·汤姆逊　摄影

约瑟夫·约翰·汤姆逊，是著名的英国物理学家，以其对同位素的实验著称。1897 年他在阴极射线的定性和定量研究中发现了电子。阴极射线即为一股电子流。这一发现不久就引起了强烈的反响。人们才知道还存在比原子更小、建造一切元素的电子，原子也是可分的。这就将更多的科学家吸引到阴极射线和探索原子结构的研究中。

恩斯特·卢瑟夫　摄影

恩斯特·卢瑟夫是新西兰著名的物理学家，他在 1911 年最后证明了物质的原子确实具有内部结构：它们是由一个极其微小的、带正电荷的核以及围绕着它转动的一些电子组成。他的这些原子理论对当代物理学的发展做出了突出的贡献。



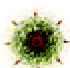
1.11 洛伦兹变换

对火车上两个特定点之间距离的测量结果表明，光的传播定律与相对性原理表面相抵触（本章第七节）是根据经典力学中两个不恰当的臆测得出的。这两个臆测是：

（1）两事件的时间间隔（时间）与参考物体的运动状况无关。

离子—介子—电子衰变　摄影

日内瓦欧洲粒子物理研究所拍摄的离子—介子—电子衰变链试验照片。



附：

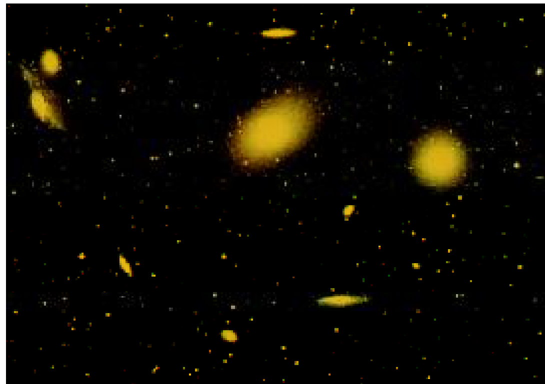
什么是洛伦兹变换

洛伦兹变换是指在狭义相对论中关于不同惯性系之间物理事件时空坐标变换的基本关系式。

设两个惯性系为 S 系和 S' 系，它们相应的笛卡儿坐标轴彼此平行，S' 系相对于 S 系沿 x 方向运动，速度为 v，且当 $t=t'=0$ 时，S' 系与 S 系的坐标原点重合，则事件在这两个惯性系的时空坐标之间的洛伦兹变换为 $x'=\gamma(x-vt)$，$y'=y$，$z'=z$，$t'=\gamma(t-vx/c^2)$，式中 $\gamma=(1-v^2/c^2)^{-1/2}$；$c$ 为真空中的光速。不同惯性系中的物理定律必须在洛伦兹变换下保持形式不变。

重力波　合成图片

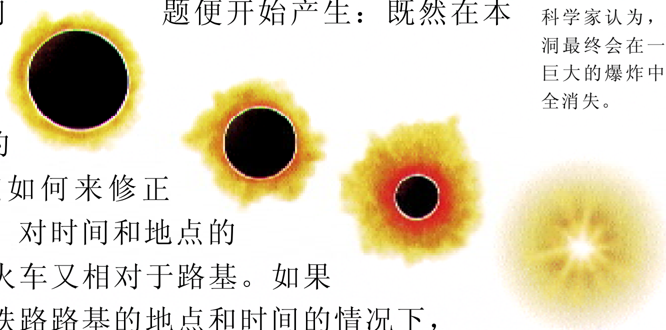
重力波是爱因斯坦广义相对论的一项预测结果。现在欧洲的一项太空计划，就是要侦测重力波的存在，这项计划已在1998年开始实行。



在相对论以前，洛伦兹从存在绝对静止以太的观念出发，考虑物体运动发生收缩的物质过程得出洛伦兹变换。在洛伦兹理论中，变换所引入的量仅仅看作是数学上的辅助手段，并不包含相对论的时空观。爱因斯坦与洛伦兹不同，以观察到的事实为依据，立足于两条基本原理：相对性原理和光速不变原理，着眼于修改运动、时间、空间

（2）一刚体上两点的空间间隔（距离）与参考物体的运动无关。

如果我们放弃这两个臆测，本章第七节中进退两难的局面就会消失，因为本章第六节所得出的速度相加定理是不会成立的，看来真空中光的传播定律与相对性原理可以相容，因此一个普遍性的问题便开始产生：既然在本章第六节的论述中，这两个基本经验结果之间已经有了表面的矛盾，那么我们应该如何来修正它？在本章第六节中，对时间和地点的谈论，我们既相对于火车又相对于路基。如果在已知一事件相对于铁路路基的地点和时间的情况下，



黑洞的辐射合成图片

黑洞会发散出辐射，导致其丧失能量和质量，黑洞就会变得更小，而其辐射率就会随之增大。科学家认为，黑洞最终会在一次巨大的爆炸中完全消失。

等基本概念，重新导出洛伦兹变换，并赋予洛伦兹变换以崭新的物理内容。在狭义相对论中，洛伦兹变换是最基本的关系式，狭义相对论的运动学结论和时空性质，如同时性的相对性、长度收缩、时间延缓、速度变换公式、相对论多普勒效应等都可以从洛伦兹变换中直接得出。

洛伦兹变换的基础

（1）运动方程是线性的；

（2）假定了时空的均匀性以及空间的各向同性。

在标准位形中，对于任意事件在 S 系中的时空坐标（x，y，z，t）及 S' 系中的对应坐标（x'，y'，z'，t'），可以写下一组线性变换（其中有一些系数待定）：

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad (1)$$

对于任意 y、z，如果 $x = ut$，则 $x' = 0$，于是有

$$\begin{cases} x' = a_{11}(u)(x - ut) \\ a_{11}(0) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

根据相对性原理，得

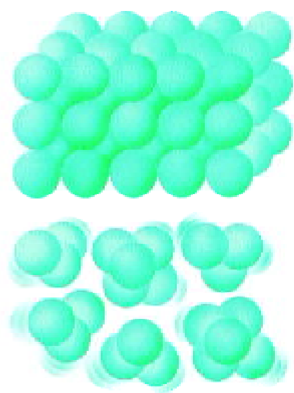
$$x = a_{11}(-u)(x' + ut') \quad (3)$$

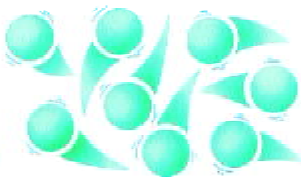
这意味着 t' 是 x、x' 的函

黑洞　合成图片

从黑洞流溢出来的热辐射带走了正能量，因此减少了黑洞的质量。随着它损失质量，黑洞的温度升高而且辐射率增大，这样它的质量损失得越来越快。我们不知道当质量变成极小时会发生什么，但是最可能的结果就是黑洞会消失。



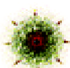




物质的四种状态　合成图片

物质有三种状态：固态、液态和气态。其实物质还有第四种状态，那就是等离子态。在茫茫无际的宇宙空间里，等离子态是一种普遍存在的状态。宇宙中大部分发光的星球内部温度和压力都很高，这些星球内部的物质差不多都处于等离子态。只有那些昏暗的行星和分散的星际物质里才可以找到固态、液态和气态的物质。

我们如何求出该事件相对于火车的地点和时间呢？对于这个问题的解答，是否能使真空中光的传播定律与相对性原理互不冲突？换句话说，我们能否设想，在每一事件相对于一个或另一个参考物体的地点和时间之间存在着某种关系，使得任一光线相对于路基或者相对于火车，其传播速度都是 c 呢？这个问题获得了一个十分肯定的答案，并且推导出了一个十分明确的变换定律，即事件



数：

$$t'=f(x,x'(x,t))=a_{44}t+a_{41}x \quad (4)$$

我们可以写下一组联立方程：

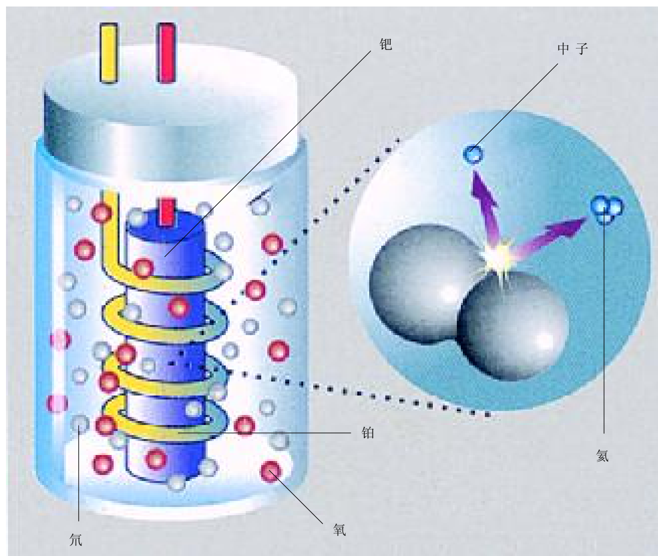
$$\begin{cases} x'=a(x-ut) \\ t'=b(t-ex) \end{cases} \quad (5)$$

解得 x：

$$x=\frac{1}{\Delta}(bx'+aut') \quad (6)$$

与（3）式相结合，有 $a=b$。至此，光速不变原理仍未使用。设在 $t=t'=0$ 时，一球面电磁波离开原点 O、O' 且以速度 c 行进，则

$$x^2+y^2+z^2=c^2t^2 \quad (7)$$

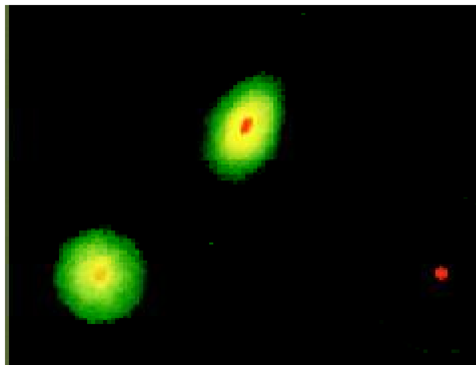


核聚变示意图

1989 年两位电化学家斯・庞斯和马・弗莱希曼宣布他们已经在室温条件下在容器内完成了核聚变。此图就是他们瓶内核聚变的示意图：当钯吸收氘原子，氘核聚变，释放出能量、中子和氦。

氢原子的内部结构　合成图片

光谱学的最大特色之一是许多不可接触和不许损伤的对象，别的仪器和别的方法无能为力时，可以用光谱方法解决问题，典型的如天文现象等。可以说，在分子和原子层次上对物质作分析研究，主要是用光谱方法。20 世纪初的物理学革命，是从光谱的实验现象引发的。普朗克的量子论就是为解释空腔黑体的光谱强度提出的，玻尔的氢原子能级理论是以氢原子光谱为根据建立的，著名的塞曼效应为量子力学理论和现代物理实验技术的发展打下了丰厚而坚实的基础。



的空间－时间值从一个参考物体变换到另一个参考物体。

在讨论这点之前，我们将提出附带的问题。直到现在为止，我们考虑的仅仅是沿路基发生的事情，在数学上，该路基所起的作用是一条假定的直线。如本章第二节指出的，我们能够想象为这个参考物体提供一个由横向和纵向的杆构成的框架，以便以该框架为参照物来确定任一处

$$x'^2+y'^2+z'^2=c^2t'^2 \quad (8)$$

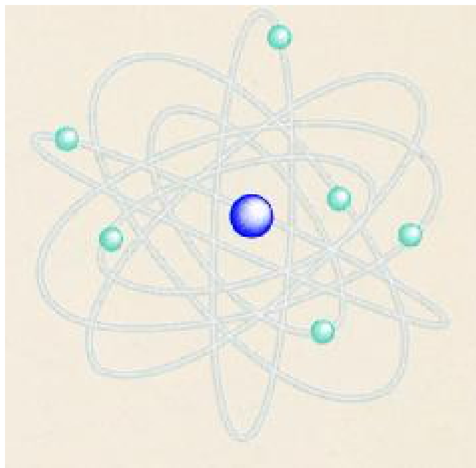
将变换方程（5）式代入（8）式，再与（7）式联立求解，可以得到

$$\begin{cases} e=\dfrac{u}{c^2} \\ a=\pm\dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}=\pm r \end{cases}$$

我们知道两参考系相对静止（u=0）时，x=x'，所以上式应取正号。

完整的变换关系为

$$\begin{cases} x'=r(x-ut) \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=r\left(t-\dfrac{u}{c^2}x\right) \end{cases} \quad (9.1)$$



卢瑟夫的原子结构　示意图

卢瑟夫是物理学史上第一个直观描述紧凑的原子结构的科学家。此图是根据其描述而制作出的示意图：带负电荷的原子沿着轨道绕带正电的原子核运动。

即洛伦兹变换。式（9.1）也可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ ict' \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r & 0 & 0 & i\beta r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -i\beta r & 0 & 0 & r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ ict \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

洛伦兹变换的物理本质：

发生的事件的空间位置。同理，假如火车以速度 v 继续在无边无际的空间行驶，那么，无论它行驶多远，我们都能参照为火车制定的框架来确定它在空间中的位置。在这两套框架中，因固体的不可入性而不断相互干扰的问题不至于造成任何根本性的错误，因此我们大可不必考虑这一点。

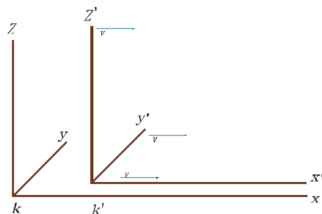
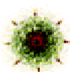


图 2

在每一上述的框架中，我们设想画出三个互相垂直的面，称之为“坐



第一，把伽利略变换式 $x'=x-ut$（或 $x=x'+ut'$）的等号右边乘上一个系数 γ 就得到洛伦兹坐标变换式：$x'=\gamma(x-ut)$（或 $x=\gamma(x'+ut')$）。再把洛伦兹坐标变换式 $x'=\gamma(x-ut)$（或 $x=\gamma(x'+ut')$）的等号两边分别除以 c，就得洛伦兹时间变换式：$t'=x'/c=\gamma(x-ut)/c=\gamma(x/c-ut/c)=\gamma(t-ux/c^2)$（或 $t=x/c=\gamma(x'+ut')/c=\gamma(x'/c+ut'/c)=\gamma(t'+ux'/c^2)$）。

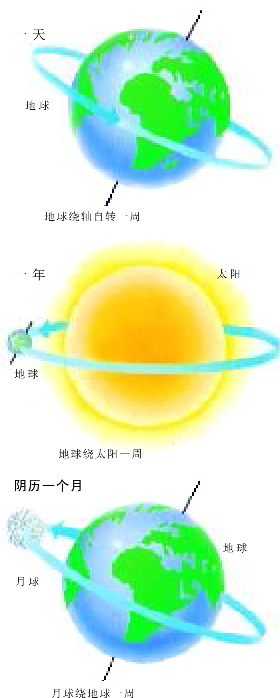
第二，将 $t=x/c$ 代入 $x'=\gamma(x-ut)$，可得 $x'=\gamma(x-ux/c)=\gamma x(c-u)/c$，令 $K=\sqrt{\frac{C+u}{C-u}}$，可得 $x'=x/k$；将 $x=ct$ 代入 $t'=\gamma(t-ux/c^2)$ 可得 $t'=\gamma(t-ut/c)=\gamma t(c-u)/c=t/k$。

同样将 $t'=x'/c$ 代入 $x=\gamma(x'+ut')$，可得 $x=\gamma(x'+ux'/c)=\gamma x'(c+u)/c=kx'$；将 $x'=ct'$ 代入 $t=\gamma(t'+ux'/c^2)$ 可得 $t=\gamma(t'+ut'/c)=\gamma t'(c+u)/c=kt$。

对于光信号到达的 p 点来说，洛伦兹变换式可以简化为 $x=ct$，$x'=ct'$，$x/x'=t/t'=k$ 。

第三，洛伦兹变换式体现的不是长度收缩，而是长度膨胀。

在式 $x'=\gamma(x-ut)$ 中，x' 是自 s' 系观察时 p 点与



时间　合成图片

一天的时间等于地球自转一周所需的时间，一年的时间约等于地球围绕太阳一周所需的时间。但这种时间划分并不是十分精确，因此通常每四年中的第四年需要增加一天以调整时间的落差（闰年）。一月的时间大约等于月球绕地球一周所需要的时间。

标平面”（坐标系）。于是，坐标系K对应路基，坐标系K'对应火车。一事件无论在何地点，它在空间中相对于K的位置可由坐标平面上的三条垂线x、y、z确定，而关于时间则由另一时间值t来确定。相对于K'，此同一事件的空间位置和时间将由相应的且与x、y、z、t并非全等的量值x'、y'、z'、t'来确定。上面已作了如何将这些量值看作为物理测



肥皂泡的色彩　合成图片

肥皂泡的色彩只有在光是持续波的情况下，才能得到满意的解释。这些色彩是许多不同路径的光叠加在同一点后形成的结果。如果光是不连续的，一个质点会完全占据一个点，因此无法叠加上去。

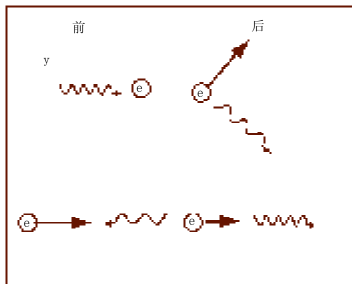
坐标原点o'的距离。自s系观察时这一距离（即p点与o'的距离）为$L_o=x-ut$，若自s'系观察时p点与o'的距离为L，显然有$L=\gamma L_o$。也就是长度膨胀。

同样在式$x=\gamma(x'+ut')$中，x是自s系观察时p点与坐标原点o的距离。自s'系观察时这一距离（即p点与o的距离）为$L_o=x'+ut'$，若令自s系观察时p点与o的距离为L，显然有$L=\gamma L_o$。

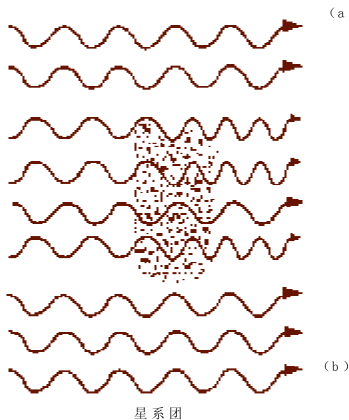
由此可知，长度膨胀是相互的。

第四，洛伦兹变换式中不光直接体现了长度膨胀，还直接体现了时间膨胀。分析如下：

在式$t'=\gamma(t-ux/c^2)$中，将$x=ct$代入可得$t'=\gamma(t-ut/c)=\gamma(ct-ut)/c$，再将$ct=x$代入可得$t'=\gamma(x-ut)/c$，式中$x-ut$是自$s$系观察$o'$点与$p$点的距离，$(x-ut)/c$是自$s$系观察光信号由$o'$点到$p$点所用时间间隔，令这一时间间隔为$\Delta t$，则自$s'$系观察时这一时间间隔为$\Delta t'=x'/c=t'$，显然有$\Delta t'=\gamma\Delta t$，也就是时间膨胀。



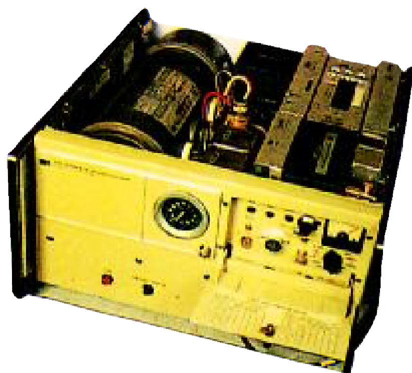
（a）



（b）

宇宙背景辐射光子　示意图

当低能宇宙背景辐射光子击中星系团内的热气体时，逆康普顿散射使得一些光子从黑体普峰的低能侧跃迁到高能侧。



原子钟　摄影

1946 年美国物理学家利比首创了原子钟的原理。两年之后，在华盛顿国家标准局诞生了第一台原子钟。原子钟靠计算铯原子或者氨原子的天然振动来计时，准确性相当高，300 年中的误差不到 1 秒。

量结果的详细叙述。

很明显，我们的问题能够用公式正确地表述如下。若一事件相对于 K' 的 x'、y'、z'、t' 的值已经给定，问相对于 K 的 x、y、z、t 的值是多少？在选定关系式时，无论是相对于 K 或是相对于 K'，对于同一光线而言，真空中光的传播定律必须被满足。若这两个坐标系在空间中的相对取向如图 2 所示，这个问题就可以由下列方程组解出：

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$



同样 $t'=\gamma(t'+ux/c^2)$ 中，将 $x'=ct'$ 代入可得 $t=\gamma(t'+ut'/c)=\gamma(ct'+ut')/c$，再将 $ct'=x'$ 代入可得 $t=\gamma(x'+ut')/c$，式中 $x'+ut'$ 是自 s' 系观察 o 点与 p 点的距离，$(x'+ut')/c$ 是自 s' 系观察光信号由 o 点到 p 点所用时间间隔，令这一时间间隔为 Δt，则自 s 系观察时这一时间间隔为 $\Delta t'=x/c=t$，显然有 $\Delta t'=\gamma\Delta t$。

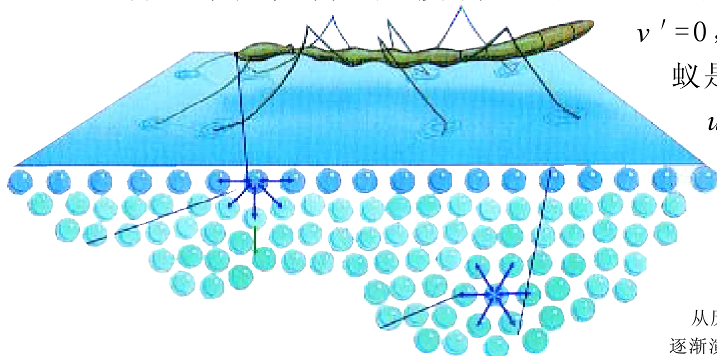
由此可知，时间膨胀也是相互的。

第五，相对论认为钟慢效应与尺缩效应对应，而我发现时间膨胀必对应长度膨胀。这一点从 $x/x'=t/t'=k$ 也能看出来。下面具体分析：

设在 s 系的 x 轴上的有一根静止的刚性棒，棒的长度为 L_0，靠近坐标原点的一端为 A 端，另一端为 B 端，有一蚂蚁以速度 $v=u$ 在棒上由 A 端爬向 B 端，s' 系以速度 u 相对于 s 系沿 x 轴正方向运动。

自 s 系观察蚂蚁由 A 端爬到 B 端用时 $\Delta t=L_0/v=L_0/u$，

自 s' 系观察蚂蚁的速度 为 $v'=(v-u)/[1-(uv/c^2)]$，将 $v=u$ 代入可得 $v'=0$，也就是说在 s' 系看来蚂蚁是静止的；而棒却以速度 u 沿 x' 轴负方向运动，自



凝聚态物理学　示意图

凝聚态物理学已经成为当代物理学中最重要和最丰产的分支学科。它的特征在于与其他学科相互渗透迅速。从历史来看，凝聚态物理学是由固体物理学逐渐演变而来的。

$$Y' = y$$
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}\cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v}{c^2}}}$$

这个系统的方程组称为“洛伦兹变换”。

如果光的传播定律被旧力学中所隐含的时间和长度具有绝对性的假定所替代，那么我们将会得到如下方程组：

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$t' = t$$

这被称为“伽利略变换”，在洛伦兹变换方程中，假如光速 c 被无穷大值

布鲁克海文　摄影

布鲁克海文国家实验室(BNL)位于纽约长岛萨福尔克县(SUFFOLK COUNTY)中部，隶属美国能源部，由石溪大学和BATTELLE成立的公司布鲁克海文科学学会负责管理。BNL具有50年杰出科学成就的历史，拥有3台开展研究用的反应堆、数台不同类型的粒子加速器和多种先进的研究装置。它开创了核技术、高能物理、化学和生命科学、纳米技术等多个领域的研究，取得多项令世界瞩目的重大成果，并数次获诺贝尔奖。BNL已成为世界著名的大型综合性科学研究基地。



s' 系观察棒的B端到达蚂蚁用时　$\Delta t' = L/u$　。

1. 若 $L = L_0/\gamma$，则 $\Delta t' = (L_0/\gamma)/u = (L_0/u)/\gamma = \Delta t/\gamma$，$\Delta t > \Delta t'$，与钟慢效应矛盾。

2. 若 $L = \gamma L_0$，则 $\Delta t' = \gamma L_0/u = \gamma\Delta t$，$\Delta t < \Delta t'$，与钟慢效应不矛盾。

注：钟慢效应即我系钟准，彼系钟慢。自 s' 系观察应有 $\Delta t < \Delta t'$。

总结：在洛伦兹理论中，变换所引入的量仅仅被看作是数学上的辅助手段，并不具有物理本质，看上去烦琐难记。爱因斯坦赋予了洛伦兹变换崭新的物理内容。借助 $x = ct$ 和 $x' = ct'$，我们看到洛伦兹变换式本身已经包含了长度膨胀和时间膨胀，不用另行推导。长度膨胀和时间膨胀就是洛伦兹变换的物理本质。

代换，就可以得到伽利略变换方程。

因此我们很容易看到，根据洛伦兹变换，无论对于参考物体 K 还是 K'，真空中光的传播定律都将被满足。例如沿正 x 轴发出一个光信号，所产生的光刺激将按照下列方程前进：

$$x = ct'$$

也就是以速度 c 前进。按照洛伦兹变换，x 和 t 之间有了一个简单的关系，则在 x' 和 t' 之间必然也存在一个相应关系，实际上也是如此，如果我们把 x 的值 ct 代入洛伦兹变换的第一个和第四个方程中，就得到：

$$x' = \frac{(c-v)t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{(1-\frac{v}{c})t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

这两方程相除，直接得出下式：

$$x' = ct'$$

根据这种理解，如果参照坐标系 K'，光的传播便依照此方程式进行，我们因而看到，相对于参考物体 K'，光的传播速度同样等于 c。简而言之，对于沿任何方向传播的光我们也得到同样的结果。当然，这一点并不令人惊讶，因为洛伦兹变换方程就是由该观点推导出来。

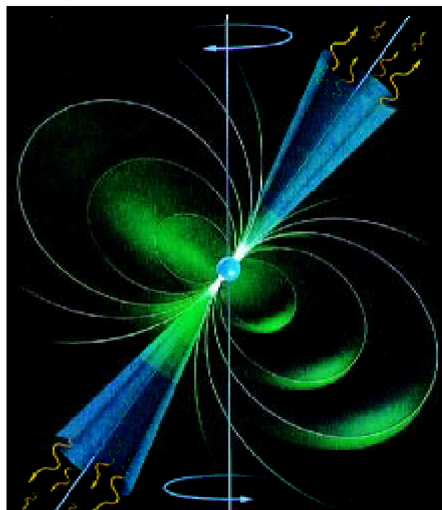
激光　　合成图片

激光的相干性很好，用透镜能把它聚集成极细的光束，在这束光的作用下，任何材料都会被烧熔、汽化。总光能还不及一只15　瓦灯泡点亮一秒钟发出的光能的激光束，就能将1.5米远处的一块厚约2厘米的钢板打出一个孔。人们可以利用激光的这种属性为自己的生活造福。



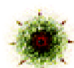
脉冲星　　合成图片

人们最早认为恒星是永远不变的。因为大多数恒星的变化过程是如此的漫长，人们根本觉察不到。然而，并不是所有的恒星都那么平静。后来人们发现，有些恒星也很“调皮”，变化多端。于是，就给那些喜欢变化的恒星起了个专门的名字，叫“变星”。脉冲星，就是变星的一种。脉冲星是在1967年首次被发现的。当时，还是一名女研究生的贝尔，发现狐狸星座有一颗星发出一种周期性的电波。经过仔细分析，科学家认为这是一种未知的天体。因为这种星体不断地发出电磁脉冲信号，人们就把它命名为“脉冲星”。



对洛伦兹变换的简单推导的一点补充

图2 表示的是 x 轴永远重合的两坐标系的相对取向，根据图示，我们可以把问题分为几部分，任何一个这样的事件，首先只考虑 x 轴。坐标系 K



由横坐标 x 和时间 t 来表示，坐标系 K' 则由横坐标 x' 和时间 t' 来表示。当 x 和 t 是给定的时，我们需要求出 x' 和 t'。

一个光信号，沿着正 x 轴前进，由方程

$x=ct$ 或者 $x-ct=0$（1）表示。

既然同一光信号必须以速度 c 相对于 K' 传播，所以相对于坐标系 K' 的传播将由类似的公式

$x'-ct'=0$（2）表示。

满足（1）的空间－时间点（事件）必须也满足（2），很明显，这是成立的，只要关系

$$(x'-ct')=\lambda(x-ct) \qquad (3)$$

被满足，那么，λ 表示一个常数；因为，依照（3），$(x-ct)$ 为零时 $(x'-ct')$ 就必然也为零。

如果对沿着负 x 轴传播的光线采用相同的思考，我们得到条件

$$(x'+ct')=\mu(x+ct) \qquad (4)$$

方程（3）和（4）相加（或相减），将常数 λ 和 μ 代之以 a 和 b，令

$$a=\frac{\lambda+\mu}{2}$$

$$b=\frac{\lambda-\mu}{2}$$

我们得到方程

$$\left.\begin{aligned} x'&=ax-bct \\ x'&=act-bx \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

我们从已知常数 a 和 b 可以得出我们问题的解。a 和 b 的确定由下述讨论得出。

相对于 K' 的原点我们永远有 $x'=0$，按照（5）的第一个方程



脉冲星星象　合成图片

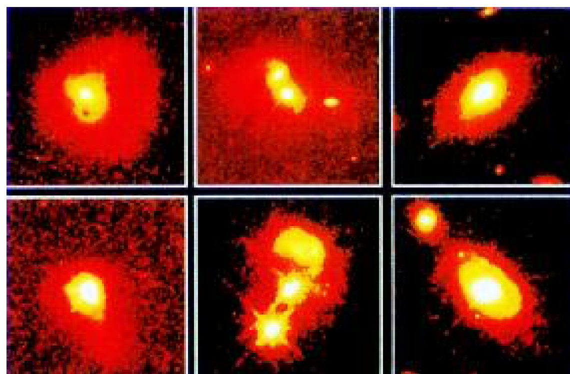
脉冲星发射的射电脉冲的周期性非常有规律。一开始，人们对此很困惑，甚至曾想到这可能是外星人在向我们发电报联系。据说，第一颗脉冲星就曾被叫做“小绿人一号”。经过几位天文学家一年的努力，终于证实，脉冲星就是正在快速自转的中子星。而且，正是由于它的快速自转而发出射电脉冲。



范弗莱克　摄影

范弗莱克，美国物理学家。他先后在哈佛、明尼苏达和威斯康星大学执教，1934 年又回到哈佛大学长执教席。 他的主攻方向是在用量子力学方法研究原子内部电子分布的基础上，探察单个原子的磁学性质。20 世纪 30 年代，他提出了一种考虑电子受其近邻电子影响的理论，它目前仍是磁学领域内的基础理论，并使范弗莱克成为1977 年诺贝尔物理学奖的获得者之一。





类星体　合成图片

类星体是一种光度极高、距离我们极远的奇异天体。在分光观测中，它的谱线具有很大的红移，又不像恒星，因此称为“类星体”。类星体由体积很小、质量很大的核和核外的广延气晕构成。核心辐射出巨大的能量，激发气晕中气体，产生连续光谱上叠加的强且宽的发射线。多数天文学家相信，这种异常巨大的能量来源是由中心的超大质量黑洞吸积周围物质释放的引力能提供的。

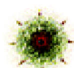
$$x = \frac{bc}{a}t$$

如果将 v 视为 K' 的原点相对于 K 的运动速度，我们就有

$$v = \frac{bc}{a} \qquad (6)$$

同一值 v 可以从方程式（5）得出，如果我们计算 K' 的另一点相对于 K，或者相对于 K' 的速度（指向负 x 轴），那么，我们可以指定 v 为两坐标系的相对速度。

此外，相对性原理教给我们，由 K 判断的，相对于 K' 来说保持静止的量杆的长度，必须恰好等于由 K' 判断的，相对于 K 保持静止的量杆的长度。我们只需从 K 对 K' 拍个“快照”，就能看到由 K 观察 x 轴上的诸点的模样，这意味 t（K 的时间）的一个特别的值的引进，例如 $t=0$，对于 t 的值，我们从（5）的第一个方程就得到



$$x' = ax$$

因此，x 轴上两点间的距离为 $x' = 1$，这是我们在 K' 坐标系中测量到的，该两点在我们的瞬间快照中相隔的距离是

$$\Delta x = \frac{1}{a} \qquad (7)$$

但是如果从 $K'(t'=0)$ 拍取瞬间快照，而且从方程（5）消去 t 考虑的表示式（6），我们得到

$$x' - a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)x$$

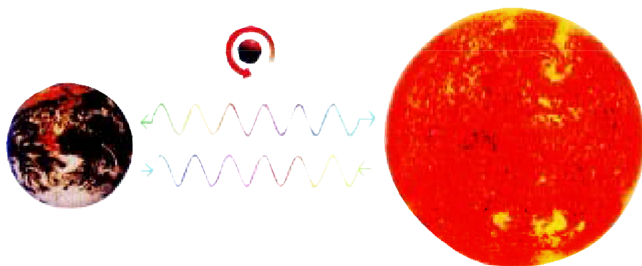
由此得出，在 x 轴上相隔距离 1（相对于 K）的两点，在快照上将是距离

$$\Delta x' - a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad (7a)$$

但是根据以上所述，这两个快照必须相等；因此（7）中的 x 必须等于（7a）中的 x'，这样就得到

$$a = \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (7b)$$

常数a和b由方程（6）和（7b）决定。在（5）中代入这两个常数的值，将得到本章第十一节所提出的第一个和第四个方程式：



电磁力　合成图片

电荷、电流在电磁场中所受力的总称。也有称载流导体在磁场中受的力为电磁力，而称静止电荷在静电场中受的力为静电力的。

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \quad (8a)$$

因而我们得到了x轴上的洛伦兹变换。它满足条件

$$x'^2 - c^2t'^2 = x^2 - c^2t^2 \quad (8b)$$

为将发生在x轴外面的也包括进去，我们把此结果加以推广。此项推广只保留方程（8 a ）并补充以下关系式

$$\left.\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

就能得到。

这样，我们满足了无论对于坐标系K或者K'中的任意方向的光线在真空中速度不变的公设，证明如下。

我们假设时间$t=0$时从K的原点发出一个光信号。这个光信号按照方程

$$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}=ct$$

传播，或者方程两边取平方，光信号依照方程

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0$$

（10a）传播。

从K'去判断，光的传播定律与相对性公设要求所考虑的信号相结

阿波罗小行星　合成图片

宇宙中所有运行到地球轨道内来的小行星称为“阿波罗”小行星，而“阿波罗”是这类小行星被人类发现的第一颗。该小行星的外观并不是圆形的，而且它的表面相当不规则。





布里斯托大学　摄影

英国布里斯托的布里斯托大学始建于1876年，1909年获得皇家特许。该校在研究和教学质量方面处于世界前列。而其享有很高声誉的医药专科学校则建立于1833年，与此校其他科系相比，是历史最为悠久的。

布里斯托大学共设六大院系：文学、工程、法律、医学（包括兽医和牙医）、科学和社会科学（包括教育学）。

合，按照对应的公式

$r' = ct'$ 或者

$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=0$（10b）传播。

为了从方程（10a）中推出方程（10b），我们必须有

$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=\tilde{A}(x^2+y^2+z^2-c^2t^2)$（11a）

由于方程（8b）必须与 x 轴上的点对应成立，我们因而有 $\tilde{A}=1$，很容易看出，对于 $\tilde{A}=1$，洛伦兹变换确实满足由（8b）和（9）推出的（11a），因而（11a）也可由（8）和（9）推出。这样我们导出了洛伦兹变换。

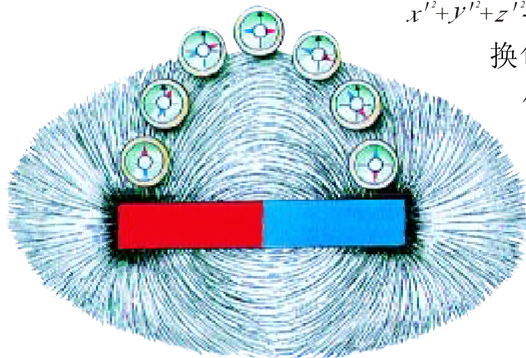
由（8a）和（9）表示的洛伦兹变换还需要加以推广。很明显，K'的轴是否与 K 的轴在空间中相互平行并不重要。同时，K'相对于 K 的平移速度是否沿 x 轴的方向也不重要。通过简单考虑，我们能够证明通过两种变换建立起广义的洛伦兹变换，这两种变换就是狭义的洛伦兹变换和完全的空间变换。完全的空间变换与一个直角坐标系被一个指向其他方向的新的直角坐标系代换相当。

用数学方法来描述推广了的洛伦兹变换的特性：

推广了的洛伦兹变换就是用 x、y、z、t 的线性齐次函数来表示 x'、y'、z'、t'，这种性质又必须使关系式被恒等满足。

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2 \quad (11b)$$

换句话说：如果我们用 x、y、z、t 来代换在（11b）左侧的 x'、y'、z'、t'，则（11b）的两边完全一致。



磁力场　合成图片

在磁体周围有一个人眼看不见的磁场。在磁场内磁体有一种磁力。用铁屑我们能够发现这种磁场是什么样子的。当铁屑在磁场中时，它们就围绕着磁体形成一个磁场的图形。



1.12 量杆和钟在运动时的行为

沿K'的x'轴放置一根米尺，令其起点与点$x'=0$重合，终点与点$x'=1$重合。问米尺相对于参考系K的长度是多少？我们只要求出在参考系K的某一特定时刻t、米尺的起点和终点相对于K的位置，就



银河系　　合成图片

银河是一个星系，它比普通的星系稍微大一些，直径大约为十万光年。银河系中至少有2 000亿颗星。其中，大约400亿颗星集中在中央的核球（Bulge）上，四周缠绕着四只旋臂，由气体和尘埃物质混杂的区域。核球的直径为3 000光年，呈椭球形，由年龄超过100亿年的老年星球构成。银河系的历史已经有150亿光年。

附：

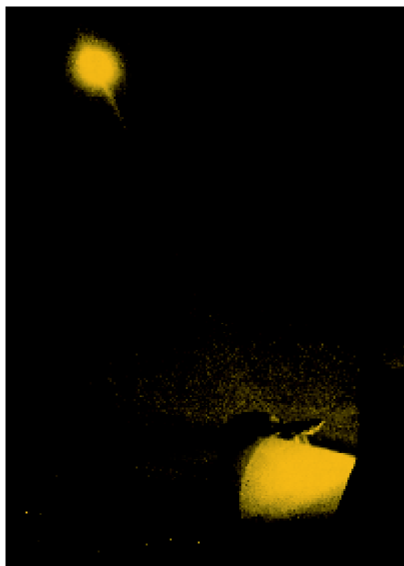
伽利略变换

在同一时刻，同一物体的坐标从一个坐标系变换到另一个坐标系，叫做坐标变换。联系这两组坐标的方程，叫做坐标变换方程。

设两个惯性参考系S和S'，参考系S'，设时刻$t=t'=0$时，两坐标系的坐标原点O与O'重合，则某一时点P的坐标变换方程是：

$$\begin{cases} x'=x-ut \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=t \end{cases} \quad 或 \quad \begin{cases} x=x'+ut' \\ y=y' \\ z=z' \\ t=t' \end{cases}$$

这叫做伽利略坐标变换方程。



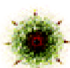
激光束　　合成图片

激光束就是激光。激光，是一种崭新的光源，是由激光器产生的一种光。激光是20世纪以来，继原子能、计算机、半导体之后，人类的又一重大发明。激光是在有理论准备和生产实践迫切需要的背景下应运而生的，它一问世，就获得了异乎寻常的飞速发展。激光的发展不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生，而且导致整个一门新兴产业的出现。激光可使人们有效地利用前所未有的先进方法和手段，去获得空前的效益和成果，从而促进了生产力的发展。



欧洲核子研究中心　摄影

欧洲核子研究中心（CERN）是世界上最大的粒子物理研究中心。它位于法国和瑞士的交界处，系欧洲第一个联合科研机构，主要为物理学家们提供必要的研究工具，即加速器和探测器。



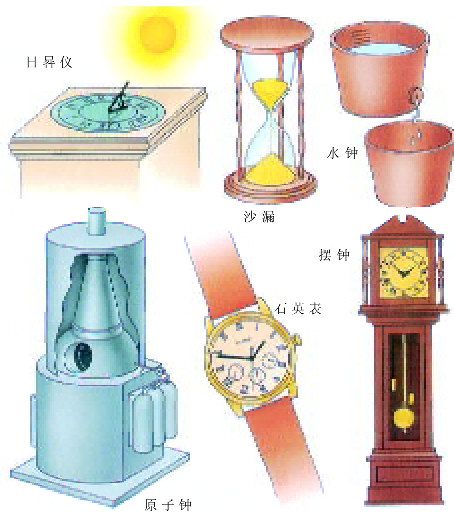
这个变换方程已经对时间、空间性质作了某些假定。这些假定主要有两条：

第一，假定了时间对于一切参考系都是相同的，即假定存在着与任何具体参考系的运动状态无关的同一的时间，表现为 $t=t'$。既然时间是不变的，那么，时间间隔在一切参考系中也都是相同的，即时间间隔与参考系的运动状态无关。时间是用钟测量的数值，这相当于假定存在不受运动状态影响的时钟。

第二，假定了在任一确定时刻，空间两点间的长度对于一切参考系都是相同的，也就是假定空间长度与任何具体参考系的运动状态无关。

经典力学时空观（绝对时空观）

牛顿说："绝对的、真正的和数学的时间，就其本质而言，是永远均匀地流逝着，与任何外界事物无关。""绝对空间，就其本质而言，是与任何外界事物无关的，它永远不动、永远不变。"



计算时间的仪器　合成图片

从古至今，人们计算时间的方式有很多种。沙漏及水钟是利用沙或水由一容器流向另一容器的速度来计时。钟摆时钟以摆动的钟摆来计算时间。石英表和原子钟分别利用石英晶体及原子的振动来计算时间。

会知道这个长度。借助于洛伦兹变换第一方程，该两点在 $t=0$ 的时刻其值表示为

$$X_{(\text{米尺始端})}=0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$X_{(\text{米尺终端})}=1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

两点间的距离为

$$\sqrt{1-v^2/c^2}$$

但米尺以速度 v 相对于 K 移动。因此，沿本身长度方向以速度 v 移动的刚性米尺的长度为 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 米，因而刚性米尺在运动时比静止时短，而且进行越快运动的刚性米尺就越短。当速度 $v=c$，我们就有 $\sqrt{1-v^2/c^2}=0$，对于比这更大的速度，平方根就变为虚值，由此的结论为：在相对论中，速

按照这种观点，时间和空间是彼此独立的，互不相关，并且不受物质和运动的影响。这种绝对时间可以形象地比拟为独立的不断流逝着的流水；绝对空间可比拟为能容纳宇宙万物的一个无形的、永不动的容器。

伽利略变换是绝对时空观的数学表述。

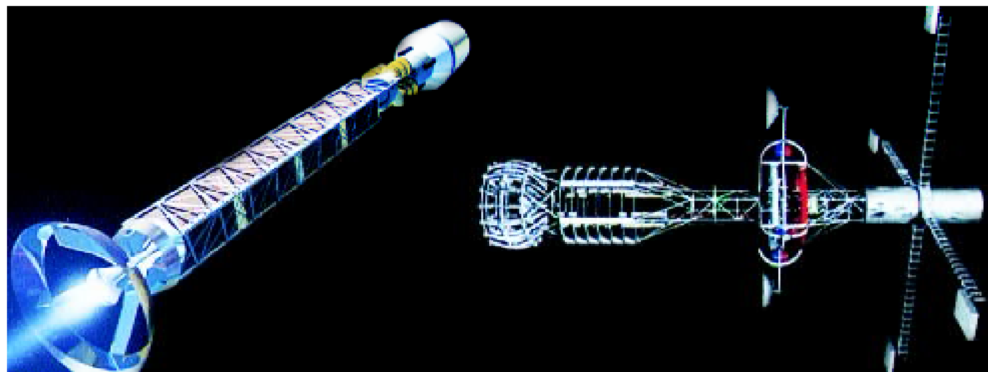
伽利略速度变换法则：

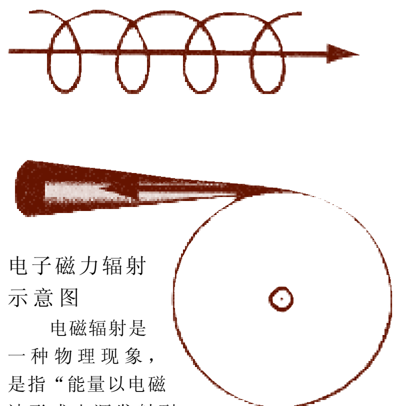
$$\begin{cases} v_x'=v_x-u \\ v_y'=v_y \\ v_z'=v_z \end{cases}$$

加速度变换关系为：

反物质飞船　合成图片

反物质就是由反粒子组成的物质。所有的粒子都有反粒子，这些反粒子的特点是其质量、寿命、自旋、同位旋与相应的粒子相同，但电荷、重子数、轻子数、奇异数等量子数与之相反。反物质飞船就是利用这种原理来实现飞行的。





电子磁力辐射示意图

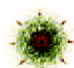
电磁辐射是一种物理现象，是指“能量以电磁波形式由源发射到空间的现象”。电磁环境是“存在于给定场所的所有电磁现象的总和”。电磁辐射源有两大类：一是自然界电磁辐射源，来自某些自然现象，如雷电、太阳的黑子活动等。二是人工型电磁辐射源。人工型电磁辐射源、来自人工制造的若干系统或装置与设备。

度 c 的意义为极限速度，任何实在的物体既不能达到也不能超出它。

当然，作为极限速度的速度 c 的这个特性也可以从洛伦兹变换方程中看到，如果选取了大于 c 的 v 值，这些方程就没有意义。

反之，如果所思考的是静止在 x 轴上，相对于 K 的一根米尺，我们就应发现，当从 K' 去判断时，米尺的长度是 $\sqrt{1-v^2/c^2}$，这与我们进行考察的基础，即相对性原理完全吻合。

从先验的观点来看，我们一定能够认识到变换方程中量杆和钟的物理行为，因



$$\begin{cases} a'_x = a_x \\ a'_y = a_y \\ a'_z = a_z \end{cases}，即\ a' = a$$

在所有惯性系中，加速度是不变量。

中国钟表技术史

12 世纪，金人入侵中原，苏颂古钟被毁，中国传统制表技术辗转流传。蒙古人入主中土后，仅让占星术继续发展，以保国运，其余所有有关计量时间的学问，都一概漠视。

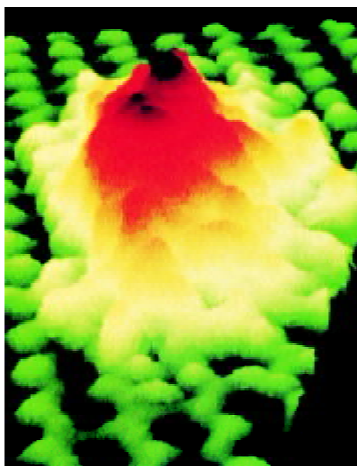
16 世纪中叶，最早一批从欧洲传到中



牛顿

布莱克　版画　1795 年

在这幅版画上，布莱克把牛顿画成了神的样子，在设计创造世界的蓝图。牛顿还是学生时就发明了微积分技巧。1687 年出版的《自然哲学的数学原理》书中，包含了他的三大运动定律，在世界范围产生着深远的影响。



石墨原子　合成图片

石墨是碳的结晶体，是一种非金属材料，色泽银灰、质软，具有金属光泽。莫氏硬度为1~2，比重为2.2~2.3，其容重一般为 1.5~1.8。石墨具有相当高的导热性和导电性，其导电性比不锈钢高4 倍，比碳素钢高2 倍，比一般的非金属高100 倍。其导热性，不仅超过钢、铁、铅等金属材料，而且随温度升高导热系数降低，这和一般金属材料不同，在极高的温度下，石墨甚至趋于绝热状态。因此，在超高温条件下，石墨的隔热性能是很可靠的。此图为石墨的原子结构示意图。

为z、y、x、t的值正是借助量杆和钟所获得的测量结果。如果我们以伽利略变换为基础进行考虑，就会得出量杆因运动而收缩的结果。

假设我们现在考虑放在K'的原点（$x'=0$）上一个永久不变的秒钟。$t'=0$ 和$t'=1$ 对应于该钟的两滴嗒声。对于这两滴嗒声响，洛伦兹变换第一和第四方程式给出：

国的时钟，由耶稣会教士引入。他们以传扬基督信仰，建立天国为志，借着传扬西方科学知识来达到宣教目的。1582 年，第一个洋钟运入中国，并于同年12 月27 日献给两广总督陈瑞。

1601 年，利玛窦神父到中国，向万历皇帝进贡了一座有驱动坠的铁钟。它每小时发声四次；钟身置于木柜内，柜身刻有龙饰，以鹰嘴指示用汉字写成的时间刻字。利玛窦神父本人连同两位本地工匠造了一个铜钟，可以每隔两小时（一更）报时一次。

中国宫廷的造钟坊是清乾隆年间（1736～1795 年）建立的，监督的沙林神父属下有差不多100 名奴仆。

1810 年左右，有几份报告提到当时在广东省售卖时钟的西方商人，说他们惨淡经营，原因是要面对来自本地产品的竞争——它们可以以低一半的价钱出售。

1824 年，宝威兄弟从瑞士到广东经商，复兴了钟表业。当时，宝威的手表是在纳沙泰尔的弗勒里耶生产。时至今日，这些地方仍然是制表的中心。

1840 年，宝威兄弟率先为自己的产品采用了中国的商标名称，叫做“宝哗”或“播威”，都是从“宝威”字音译而来的。直至20 世纪之初，这牌子仍然深受欢迎。

中国测时工具的历史

杆影测时　古人很早就知道，直立的标杆影长不断地随太阳在天上的



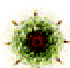
$t=0$

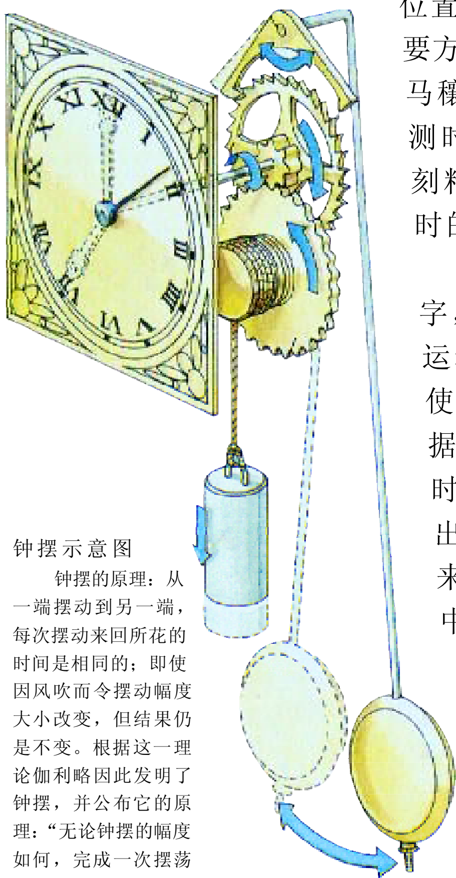
$$t'=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

由 K 判断，该钟以速度 v 运动；由参考物体判断，该钟在两次滴嗒声之间所经过的时间不是 1 秒，而是比 1 秒钟长一些的 $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ 秒。由此可看出，该钟在静止时比运动时走得快一点。速度 c 在此的意义也是一种不可达到的极限速度。

奥本海默　摄影

美国杰出的物理学家奥本海默由于在“曼哈顿计划”中卓越的管理才能，被称为“原子弹之父”。他根据爱因斯坦的相对论原理制造出了世界上第一颗原子弹。





钟摆示意图

钟摆的原理：从一端摆动到另一端，每次摆动来回所花的时间是相同的；即使因风吹而令摆动幅度大小改变，但结果仍是不变。根据这一理论伽利略因此发明了钟摆，并公布它的原理：“无论钟摆的幅度如何，完成一次摆荡的时间皆同。”

位置的不同而变化。看杆影比直接观测太阳要方便，但测时结果是不等时的。《史记·司马穰苴列传》中就有春秋时代“立表下漏”测时的记载。用杆影测时法测定中午的时刻精度很高，是中国古代用来校正漏壶计时的主要方法之一。

圭表　甲骨文中有关时间的字大多从日字，说明测时的依据是太阳。根据太阳的运动判断一天内的时间变迁，圭表是最早使用的仪器。一根竿子立在地上，可以根据影子的长短和方向判断季节和一天内的时刻，1967 年在江苏仪征的一座东汉墓中出土了一件铜圭表，不用时可以折叠起来，像一把铜尺，使用时将圭从表的凹槽中立起，使用和携带都很方便。

日晷　在圭表的基础上发展起来的日晷到汉代已做得很精细，1897 年和 1932 年先后在内蒙、河南、山西出土了三块秦末汉初的晷仪，上有 69 条刻线，占盘面的 2/3，其余部分没有刻线，当为黑夜见不到日影的部分。三块出

土地点不同，而其结构和所刻字体都相同，这表明秦汉时圭表和晷仪已很流行。

漏刻 作为计量时间的仪器，漏壶是最早发明的。古籍载："漏刻之作，盖肇于轩辕之日，宣乎夏商之代。"这可能是一种传说。较可靠的资料见于《周礼·夏官》，其中载有挈壶氏，由于古代的漏壶上面有一个提梁，故称挈壶。挈壶氏"掌挈壶，……以水火守之，分以日夜"。西汉以前的漏壶现在未见实物，传世最早的漏壶为西汉时制，1958年、1967年、1975年分别出土于陕西兴平、河北满城、内蒙古默特右旗，都是铜铸圆柱状，上有提梁，下有漏嘴，梁上方有小孔，是插刻箭的。



为了改进单壶漏水不均匀的缺点，东汉时代开始用二级漏壶，以便互相补偿，如张衡的漏水转浑天仪。

经过秦汉时代的发展和创造，圭表、仪象、日晷、漏刻等天文仪器得到很大发展，并已普遍使用，这些仪器构成了我国2 000年间用于天文观测和时间工作的主要仪器系列。

记时器具的种类

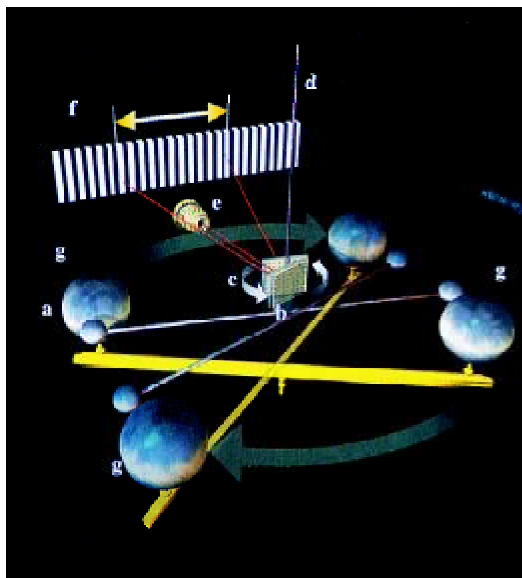
流量计时 最古老的守时工具无疑是泄水型漏壶。后来有以沙代水的沙漏，有以油灯耗油量多少来计时的灯钟，也有燃香的香篆钟（香火在金属盒内沿篆字式的沟槽蜿蜒前进）等等。中国现存最古的漏壶是西汉时代的。世界上现存最古的滴漏是公元前14世纪的埃及水钟。

机械钟 中国汉代天文学家张衡做的水运浑象，能显示恒星出没、中天等



伦敦大学 摄影

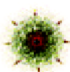
伦敦大学是成立于1836年的大学联盟，目前拥有60多家相对独立的学院及科研机构，是英国规模最大、课程最广泛的一所大学。拥有大学学院、皇家霍洛威学院、玛丽女王学院、国王学院、帝国学院、政治经济学院、亚非学院等一批世界一流的学院。性质：私立综合性大学。



卡文迪许实验　示意图

一束激光（e）被投射到刻度的屏幕（f）上确定哑铃的任意扭转。两个小铅球（a）附在哑铃（b）上，哑铃上带有一面小镜子（c），这些都自由地悬挂在扭矩纤维上。

在旋转的杆上的两个大铅球（g）放置在小铅球附近。当大铅球旋转到相反位置，哑铃振动，然后在一个新的位置安定下来。





罗马大学　摄影

罗马大学位于欧洲南部亚平宁半岛的意大利共和国，是意大利最大的国立大学。图为罗马大学教学楼的内部装饰。

天象，与室外天象完全相符。这是世界上最早的水力推动的机械钟。

唐代天文仪器制造家梁令瓒所制的水运浑象，除能符合天象外，另立两个木人每刻自动击鼓，每辰自动击钟。这是张衡水运浑象的改良型机械钟。

在宋代，苏颂和韩公廉等共同创造水运仪象台。

元代有郭守敬制的大明殿灯漏。

明代詹希元造五轮沙漏。这些机械钟具有完整的齿轮系、凸轮和擒纵机构。

欧洲的机械钟开始于14世纪，此后盛行了约400年。

摆钟　1582年，伽利略发现了摆的等时性。

1656～1657年，荷兰惠更斯把摆引入机械钟，从而创立了摆钟。

1673年，惠更斯采用摆轮-油丝系统，造出一种便于携带的钟表。

1735年，英国哈里森首次制造出航海钟，解决了当时资本主义发展中亟待解决的航海定位问题。

1896年，法国吉尧姆研制低膨胀系数的合金钢，造出精度极高的天文摆钟。如果把钟装入真空的玻璃罩内，存放在地下室，保持恒温，即为天文摆钟，每天的误差不超过千分之几秒。

1.13 速度相加法则　斐索实验

实际上，钟和量杆运动的速度与光速相比是相当小的，因此我们不会将前节的结果与真实的情况相比较。但是，在另一方面，这些结果必然使你持有异议。因此，为了说服你们，我将从该理论中再推导出另一结论，从前面的论述中推导出这个结论是很容易的，而且它已被十分完善的实验所证实。

在本章第六节，所取形式可以是经典



飞机起飞　合成图片

由于地球本身所产生的强大引力，飞机要想起飞，必须依靠发动机产生强大的推力，以摆脱地球引力的束缚，当动力达到高于地球引力时，飞机就可以顺利起飞。

附：

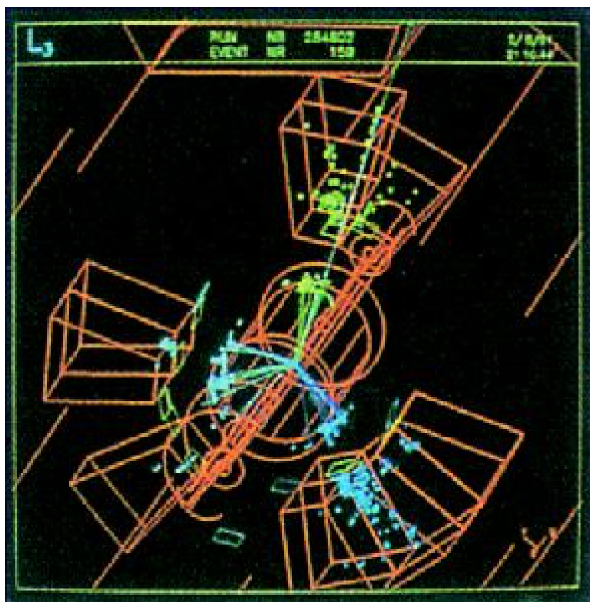
位移－时间图像

简称“位移图像”，它是用图像来表示物体位移和时间的关系。匀速直线运动的位移 s 是时间 t 的正比函数，$s=vt$。在物体的直线运动中以横轴表示物体运动的时间 t，纵轴表示物体运动的位移 s。

$s-t$ 图像的用途有：已知 s 求相应的时间 t；已知 t 求相应的位移 s；还可从直线的斜率的数值得出速度的大小。在同一坐标平面上，斜率越大，则直线越陡，表示速度越大，故可由图线求速度。

速度－时间图像

简称“速度图像”。它



微观宇宙　合成图片

这是在欧洲核子研究中心CERN1.3探测器上看到的，由计算器生成、在粒子水平上的一个事件的图像。



卡斯特勒　摄影

卡斯特勒（1902～1984 年），因发现和发展了研究原子中赫兹共振的光学方法，获得了 1966 年度的诺贝尔物理学奖。在原先的学生、后来的亲密合作者 J. 布劳塞尔的帮助下，卡斯特勒设法辨认与原子中能级相关联的支能级。

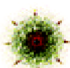
力学假设的同向速度相加定理已经被我们推导出，当然，该定理也可以十分容易地由伽利略变换（本章第十一节）推演出来。我们引入一个移动点，该点相对于坐标系 K' 按照下列方程运动来代替车厢里走动的人，即

$$x' = wt'$$

借助伽利略变换第一和第四方程，我们用 x 和 t 来表示 x' 和 t'，得到其间的关系式：

$$x = (v + w)\,t$$

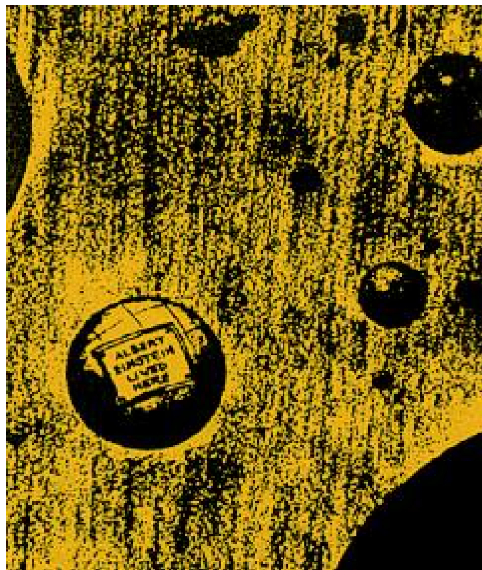
这个方程表示的是该点相对于坐标系 K 的运动定律（人相对于路基）。用符号 W 表示



是用图像来表示匀速直线运动的速度和时间的关系。当物体做直线运动时，在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，纵轴表示物体运动的速度。借助速度－时间图像可以找到运动物体在任何时刻的即时速度。它的用途较多。例如，已知时刻 t 可求相应的速度 v_t；已知即时速度 v_t，可求相应的时刻 t；图像斜率的大小表示加速度的大小，斜率的正负表示加速度的方向，故可由图线求加速度；用速度图像求质点在任何时间内的位移，位移的数值相当于速度图像曲线下的“面积”的数值，这个“面积”的单位是米（米／秒×秒），而不是米^2；可在同一坐标上比较几个物体的运动状况；并可判断某一运动过程中的几个阶段的运动性质与状况。

黑洞　合成图片

目前有两类恒星系统最可能是黑洞的候选者：一是 X 射线源——即释放 X 射线的星体，目前共发现五个。另一类是类星体，它发出的大量能量可能与黑洞有关。黑洞可侦察到的特征仍未定义清楚，因此要判定黑洞是什么还为时过早。



直线运动

质点在一条确定直线上的运动，称为“直线运动”。质点的位置，以离原点的距离、或坐标 x 表示。它

速度，我们得到与本章第六节一样的方程：

$$W=v+w \qquad (A)$$

但是我们也可以根据相对论来进行思考。在方程 $x'=wt'$ 中，我们必须明确用 x 和 t 来表示 x' 和 t'，这是引用了洛伦兹变换的第一和第四方程。这样代替方程 $W=v+w$ 的是方程

$$W=\frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}} \qquad (B)$$



漂移室　摄影

漂移室是探测粒子的速度、量能和属性的关键设备。

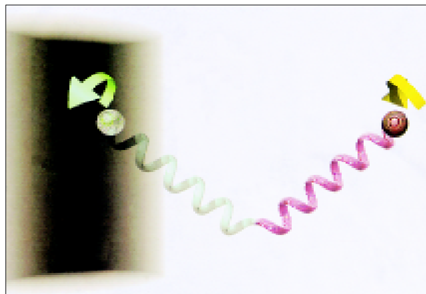
是研究复杂运动的基础。按其受力的不同可分：匀速直线运动、匀变速直线运动（包括匀加速或匀减速直线运动，以及自由落体，竖直上抛、下抛运动）、变速直线运动。

匀速直线运动

物体沿一直线运动且在任何相等的时间里位移都相等，或者说速度的大小和方向都不改变的运动，谓之“匀速直线运动”。它的特征是：速度是一个恒量，即任一时刻速度（v）都相同。它的数学表达式是 $v=\frac{s}{t}$，或 $s=vt$。式中 s 是位移，t 是发生这段位移所经过的时间。产生匀速直线运动的条件是：当运动物体所受外力的合力等于零时，物体做匀速直线运动。所以，真正的匀速直线运动实际上是很难出现的。为简化问题，不妨碍结果的准确性，而把近似的匀速直线运动当做真正的匀速直线运动来处理。

虚粒子的波函数　合成图片

虚粒子具有一个波函数，这个波函数预言两个粒子具有相反的自旋。但是如果一个粒子掉入黑洞，便不可能确定地预言余下的粒子的自旋。



变速运动

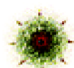
亦称“非匀速运动”。物体的速度随时间而变化，可能是快慢程度，也可能是运动方向发生变化，还可能是快慢和



抛物体的研究
合成图片

我们对抛物体的研究，如确定炮弹的最大射程，也是推动微积分创立的实际需要的典型代表。

这个方程与另一个以相对论为依据的同向速度相加定理相对应。但在这两个定理中，能更好地与经验相符合的是哪一个呢？对此，半世纪前，杰出的物理学家斐索做过的一个实验给我们以极其重



方向同时都发生改变。它是最常见的一种机械运动。按其运动的轨迹来分有直线运动和曲线运动。

极光　摄影

极光是地球周围的一种大规模放电的过程。来自太阳的带电粒子到达地球附近，地球磁场迫使其中一部分沿着磁感线集中到南北两极。当他们进入极地的高层大气时，与大气中的原子和分子碰撞并激发而产生光芒，形成极光。



变速直线运动

在相等的时间里，位移并不都是相等的直线运动。它是物体运动最常见的形式之一。由于物体运动的快慢经常改变，所以常用平均速度和即时速度这两个物理量来描述物体运动的快慢程度。

匀变速直线运动

加速度的大小和方向保持不变的直线运动。匀变速直线运动的基本特点是：在任何相等的时间内其速度的增量相等。质点在做匀变速直线运动时，其速度图线 $v-t$ 图是一条倾斜的直线，而直线的斜率就等于其加速度的大小，即

$$\tan\theta = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v_t - v_0}{t} = a$$

式中 v_0、v_t 依次为做匀变速直线运动的初速度和末速度。它的运动规律可通过几个公式反映出来：速度（v_t）与时间（t）

要的启发。斐索实验曾由一些最优秀的实验物理学家再次重新做过，因此实验的结果是毋庸置疑的。这个实验涉及到光以特定速度 w 在静止的液体中传播的问题。现在如果液体在管子 T 内以速度 v 流动，那么光在管内与箭头（见图 3 ）所指方向的传播速度究竟有多快呢？

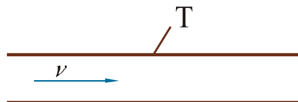
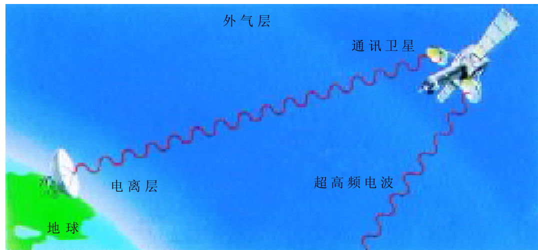


图3

根据相对性原理，我们当然认定，不论液体相对于其他物体是否处于运动状态，光相对于它总是以同一速度 w 传播。因此，光相对于液体和液体相对于管子的速度皆为已知，我们需要求出光相对于管的速度。

电波传输　合成图片

无线电波实际上是在各种空间场所内（如沿地表面，电离层等）传播的。在传播过程中，各种媒质必然要对所传输的电信号产生影响。此外，由于某些媒质的电参数具有明显的随机性，使得通过它传输的电信号也是一个随机信号，故必须考虑实际媒质对电波传播的影响。



的关系是 $v_t = v_0 + at$；位移与时间（t）的关系是 $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$；速度（$v_t$）与位移（$s$）的关系是 $v^2t = v_0^2 + 2aS$ 。当加速度是一个正恒量时，物体的运动叫匀加速直线运动；当加速度是一个负恒量时，物体的运动叫匀减速直线运动。当物体受到一个与 v_0 同方向或反方向的恒力的作用时，或者物体受到几个力的作用，这些力的合力的方向与 v_0 的方向相同或相反，合力的大小保持不变时，物体就做匀变速直线运动。

匀变速直线运动的规律可以通过下列公式反映出来，即

天文望远镜　油画

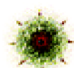
天文望远镜的光程设计需要确定透镜曲面上任一点的法线，这使得求任意曲线的切线问题变得不可回避。切线问题也是微积分学科的基本问题。



于是我们又遇到了本章第六节的问题。管相当于铁路路基或坐标系 K，液体相当于车厢或坐标系 K'，光相当于沿车厢走动的乘客或本节引进的移动点。如果 w 用于表示光相对于管的速度，那么 w 就应依照方程（A）或方程（B）计算，这视伽利略变换或洛伦兹变换谁更符合实际而定。斐索实验（斐索发现了 $w = w + v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$，其中 $n=\frac{c}{w}$ 是液体的折射率[1]，另一方面由于 $\frac{vw}{c^2}$ 与 1 比相当小，我们首先用 $w=(w+v)\left(1-\frac{vw}{c^2}\right)$ 代替方程（B），因而按照同一的近似程度可以用 $w+v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$ 代替方程（B），而这与斐索的实验结果相合）的结论是支持由相对论推出的方程（B），而且其符合的程度也很精确，根据不久前塞曼（19 世纪，物理学家法拉第研究

---

[1] 折射率：又名“折射定律”。光学介质的一个基本参量。即光在真空中的速度 c 与在介质中的相速 v 之比 $n=\frac{c}{v}$。真空的折射率等于 1。两种介质的折射率之比称为相对折射率。



速度公式 $v_t = v_0 + at$

路程公式 $S = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

速度路程公式 $v_t^2 = v_0^2 + 2aS$

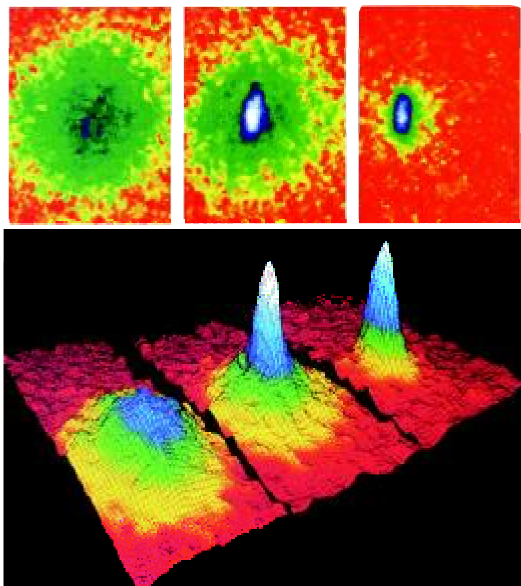
公式中共有 v_0、v_t、s、a、t 五个物理量，除 t 之外，其余四个都是矢量，但必须注意它们的方向。由于物体是做直线运动，故只需用正、负号即可表示它们的方向。通常规定初速度 v_0 的方向为正方向。当加速度 a 与 v_0 反向时，a 为负，物体做减速运动。速度路程公式是由速度公式和路程公式联立消去 t 以后得到的。可见，上述三个公式中只有两个独立，在 v_0、v_t、



费米实验室　摄影

费米国家实验室原名为国家加速器实验室，根据美国总统林登·B·约翰逊 1967 年 11 月 21 日签署的法案，由美国原子能委员会负责管理。为开展高能物理的前沿和相关学科的研究，费米国家实验室为科研人员提供实验条件及所需资源，旨在了解物质和能量的基本性质，回答宇宙由何物质组成，如何运作和来自何方。几十年来费米国家实验室获得了多项研究成果，并带动了相关技术的发展。

电磁场对光的影响，发现了磁场能改变偏振光的偏振方向。1896年，荷兰物理学家塞曼根据法拉第的想法，探测磁场对谱线的影响，发现钠双线在强磁场中的分裂。洛伦兹根据经典电子论解释了分裂为三条的正常塞曼效应。由于研究这个效应，塞曼和洛伦兹共同获得了1902年的诺贝尔



欧洲物理学会　摄影

欧洲物理学会是欧洲著名的物理科学的研究机构，自成立以来，其研究会的成员在物理学领域作出了巨大的贡献。

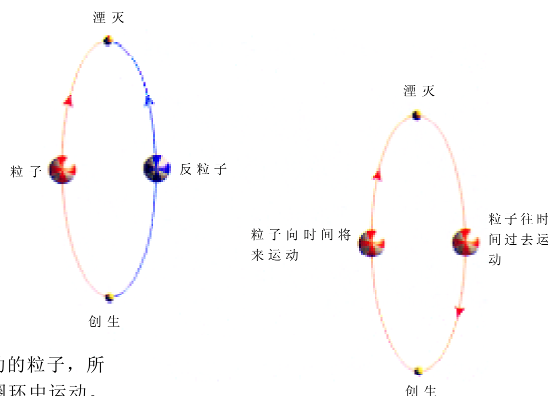
S、a、t 这五个量中必须给出三个，才能通过公式找出另外两个来。

运动叠加原理

亦称“运动的独立性原理”。是物体运动的一个重要特性，是物理学中的普遍原理之一。一个物体同时参与几种运动，各分运动都可看作是独立进行的，它们互不影响。而物体的合运动是由物体同时参与的几个互相独立的分运动叠加的结果。例如，初速不为零的匀变速直线运动是由物体同时参与的速度为 v_0 的匀速直线运动，和初速为零的匀变速直线运动叠加的结果。又如，平抛物体运动，由竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速直线运动叠加而成，而这两个运动是彼此独立的。

运动的合成

已知物体的几个分运动求其合运动谓之“运动的合成”。由于一个物体常常在同时做几种运动，其中任何一种运动，不影响其他运动。为研究起来方便，将这个物体的整体运动看



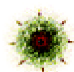
虚粒子　合成图片

一个虚粒子可以被认为是一个往时间过去运动的粒子，所以虚粒子对可以被认为是一个粒子在时空的闭合圈环中运动。

物理学奖。他们这一重要研究成就，有力地支持了光的电磁理论，使我们对物质的光谱、原子和分子的结构有了更多的了解。）所做的卓越的测量，说明了液体流速 v 对光的传播的影响确实可以用方程（B）来表示，并且误差在1%以内。

不过我们必须注意到，早在相对论之前，洛伦兹就提出了关于这个现象的、纯属电动力学[2]性质的一个理论，这个理论是引用物质的电磁结构的特别假说而得出。然而无论如何这并没有减弱这个实验作为支持相对论的说服性，因为最初的理论是由麦克斯韦—洛伦兹电气力学建

[2] 电动力学：电动力学是研究电磁现象的基本规律、电磁场的基本属性和它与带电物质相互作用的学科。通常所说的电动力学，是指宏观的经典电动力学，是从研究和总结宏观电磁现象中发展起来的。在宏观情形下，电磁场的运动表现为波动性，原则上宏观电动力学并不能正确处理微观尺度的电磁现象，因为在微观尺度下，电磁场表现出粒子性，而荷电粒子则显现波动性。只有当粒子的波动行为不显著，电磁场主要表现为波动性时，经典电子力学才能适用。





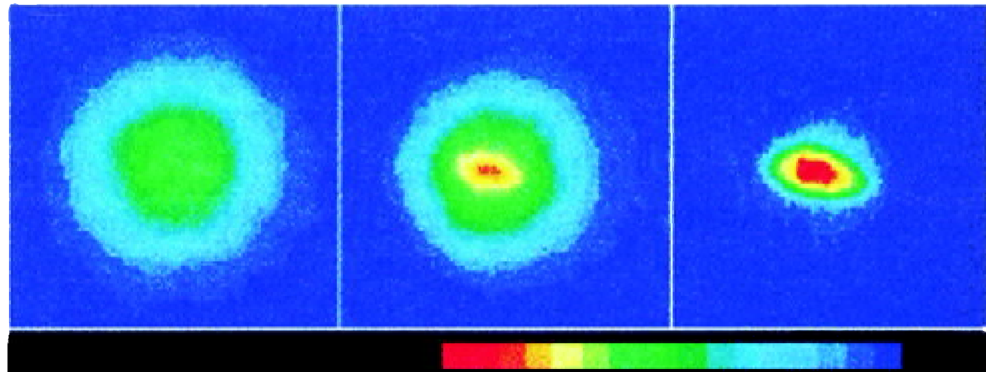
做是由几个分运动所组成的合运动。运动的合成是指位移的合成、速度的合成或加速度的合成，运动的合成遵从矢量的合成。当物体同时做两个匀速直线运动时，则其合运动也是匀速直线运动。当物体同时一个做匀速直线运动，一个做初速度为零的匀加速直线运动时，若两者在一直线上，则其合运动也是直线运动；若两者不在一直线上，则其合运动是曲线运动。

欧洲物理学会　摄影

欧洲物理学会是欧洲著名的物理科学的研究机构，从其成立以来，其研究会的成员在物理学领域作出了巨大的贡献。图为欧洲物理学会的标志。

钠原子玻色　合成图片

钠原子由一个完整而稳固的原子核和它外面的一个价电子组成。原子的化学性质以及光谱规律主要决定于价电子。



立起来的，它与相对论并无丝毫抵触之处。说得更恰当些，电气力学是相对论发展的根基，是相互独立，却又能组成电动力学本身的各个假说的综合和概括。



天文望远镜　摄影

根据物镜的结构不同，天文望远镜大致可以分为三大类：以透镜作为物镜的，称为折射天文望远镜；用反射镜作为物镜的，称为反射天文望远镜；既包含透镜，又有反射镜的，称为折反射天文望远镜。往往有的天文爱好者买了一块透镜，以为这就解决了望远镜的物镜问题。其实，一块透镜成像会产生像差，现在，正规的折射天文望远镜的物镜大都由 2～4 块透镜组成。相比之下，折射天文望远镜用途较广，使用方便。

斐索实验

1851 年，斐索观察循环水流中光速的著名实验支持了斯涅尔在光以太学说基础上对运动介质中光速给出的解释。斯涅尔公式为

反射光 $$\frac{E'_{s1}}{E_{s1}}=\frac{n_1\cos i_1-n_2\cos i_2}{n_1\cos i_1+n_2\cos i_2}=\frac{\sin(i_1-i_2)}{\sin(i_1+i_2)}$$

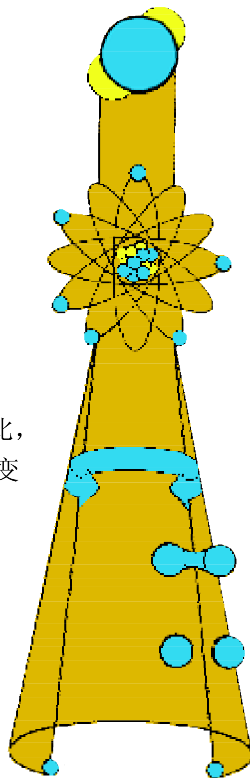
$$\frac{E'_{p1}}{E_{p1}}=\frac{n_2\cos i_1-n_1\cos i_2}{n_2\cos i_1+n_1\cos i_2}=\frac{\tan(i_1-i_2)}{\tan(i_1+i_2)}$$

折射光 $$\frac{E_{s2}}{E_{s1}}=\frac{2n_1\cos i_1}{n_1\cos i_1+n_2\cos i_2}=\frac{2\sin i_2\cos i_1}{\sin(i_1+i_2)}$$

$$\frac{E_{p2}}{E_{p1}}=\frac{2n_1\cos i_1}{n_2\cos i_1+n_1\cos i_2}=\frac{2\sin i_2\cos i_1}{\sin(i_1+i_2)\cos(i_1-i_2)}$$

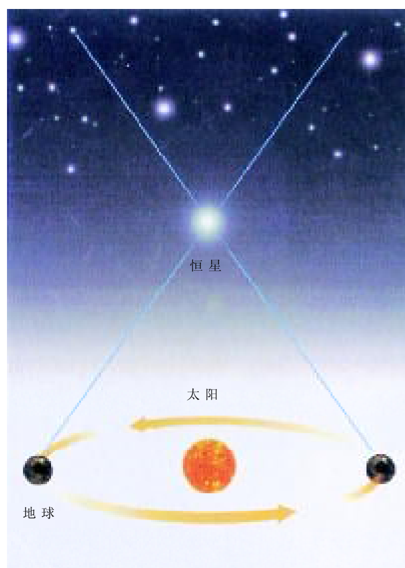
前两式表示反射波的两个分量和入射波两个对应分量之比，后两式表示折射波和入射波两个对应分量之比，振动方向的变化则由正负号来决定。

在狭义相对论创立之前，斐索实验曾是光“以太”学说的判定性实验之一，并被用来说明光介质能够为运动物体所部分拖动。



物质的构成

物质的构成一直是人们研究的对象，从宏观到微观、从定性到定量，体现了化学学科发展的趋势。对物质组成的微观研究和定量研究使化学摆脱了经验形态，逐步形成关于物质构成的科学的理论。

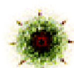


1.14 对相对论启发作用的评估

在前面各节中，我们的思路可概述如下：经验在一方面使我们确信，相对性原理是正确的；在另一方面，光在真空中的传播速度被认为等于恒量 c。把这两条结合起来，便得出有关构成自然界过程诸事件的直角坐标 x、y、z 和时间 t 在量值

地球的转动　合成图片

随着地球环绕太阳公转，附近恒星的位置相对于更遥远的恒星显得在运动。



附：

狭义相对论的问题

爱因斯坦坚信世界的内在和谐，追求理论的逻辑统一，不能容许惯性系与非惯性系之间这种内在不对称情况的存在。解决这个难题的办法，就是把狭义相对论原理扩大到非惯性系统。

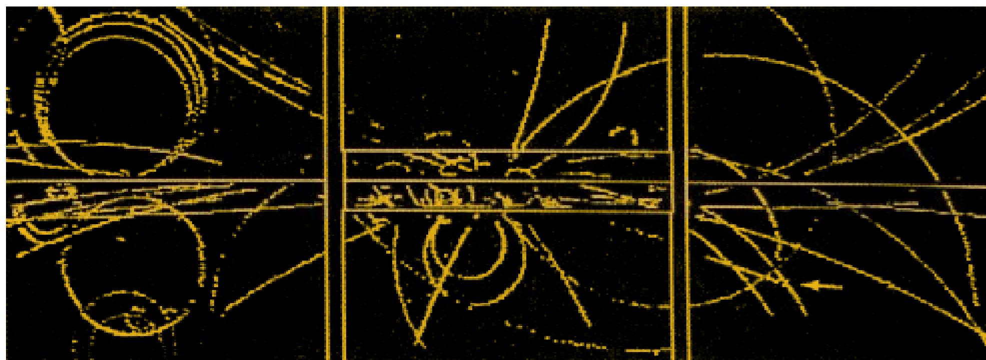
狭义相对论的另一个严重困难来自引力，因为它与牛顿的引力公式和引力势方程不相容。

牛顿的引力公式即是万有引力定律公式。

万有引力：宇宙间任何有质量

价层电子对　合成图片

在共价分子中，中心原子周围配置的原子或原子团的几何构型，主要决定于中心原子价电子层中电子对（包括成键电子对和孤对电子）的相互排斥作用，分子的几何构型总是采取电子对相互排斥最小的那种结构。



上的变换定律，这一点与经典力学不同，它不是伽利略变换，而是洛伦兹变换。

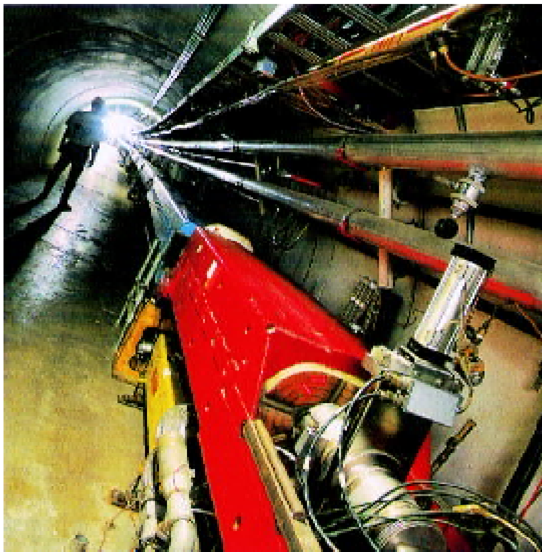


宇宙星空 合成图片

太阳只是银河系的1 000亿个恒星之一。银河系只是局部集团中的许多星系之一。局部集团只是形成宇宙中最大已知结构的几千个集团和星系团之一。

光的传播定律是我们目前的知识可以加以接受的一个定律，它在我们的思考过程中起了重要的作用。可一旦有了洛伦兹变换，我们就能结合洛伦兹变换和相对性原理，将这个理论概括如下：

每一个普遍的自然界定律必须由以下正确严密的定理建立，若代替最初的坐标系 K 的空间—时间变量 x、y、z、t 是我们新引用的坐标系 K' 的空间—时间变量 x'、y'、z'、t'，那么经过变换以后该定律仍与原来完全的形式相同。这里，带着重符号的量和不带着重符号的量之间的关系就由洛伦兹变换公式来决定。或简而言之，普遍的自然界定律对于


粒子加速器 摄影

带电粒子在电场中会受力而得到加速，提高能量，这是迄今为止的粒子加速器采用的原理，中性粒子不可能在这样的原理下得到加速。因此，粒子加速器应定义为：利用电磁场加速带电粒子的装置。粒子加速器可以加速电子、质子、离子等带电粒子，使粒子的速度达到几千公里/秒、几万公里/秒，甚至接近光速（光在真空中的传播速度是30万公里/秒）。根据相对论原理，加速器可以把带电粒子的速度增加到无限接近光速，但无论如何也达不到光速。

的物体之间的相互作用。

万有引力定律：宇宙间的一切物体都是相互吸引的。两个物体间的引力大小，跟它们之间质量的乘积成正比，跟它们的距离的平方成反比。

万有引力公式：

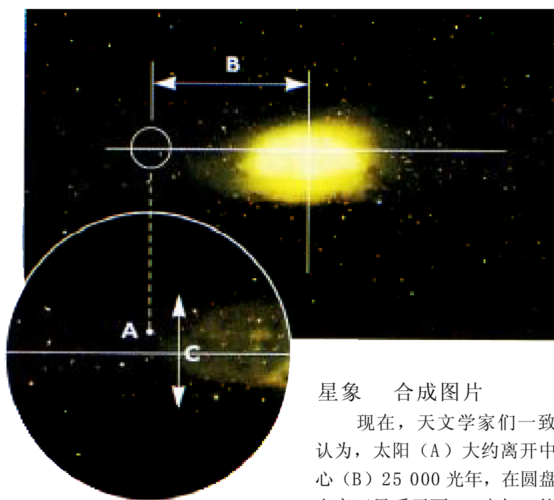
$$F=G\frac{Mm}{r^2}$$

式中，G 为万有引力恒量，$G=6.67\times10^{-11}\,\mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$；$M$、$m$ 是两物体的质量；r 为两物体的中心距离。

狭义相对论提出后，许多人曾致力于检验各种物理定律在洛伦兹变换中的协变性，他们都获得了成功。但是包括爱因斯坦本人在内，都发现一个问题：当把牛顿引力理论纳入到相对论理论之中时，却遇到了明

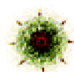
洛伦兹变换是变异的。

这是相对论要求自然界定律所符合的一个确定的数学条件。有鉴于此，在帮助探索普遍的自然界定律中，相对论具有极其宝贵的启发作用。反之，如果相对论的两个基本假定中有一个是不正确的，那么就说明这个具有普遍性的自然界定律并不成立。迄今为止，相对论究竟已经确立了哪些普遍性结果呢？现在让我们来看一看。



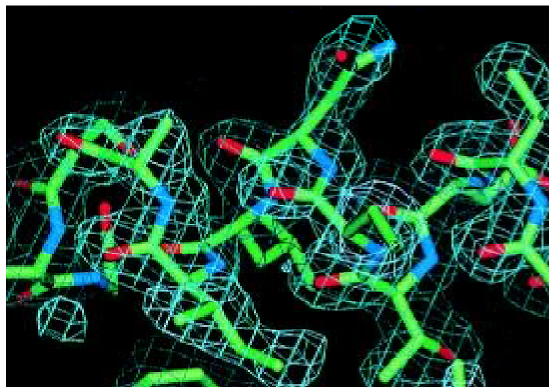
星象　合成图片

现在，天文学家们一致认为，太阳（A）大约离开中心（B）25 000光年，在圆盘上离开星系平面68光年。外圆盘在临近（C）的厚度大约为1300光年。



模拟量子系统　合成图片

量子计算可用于研究高温高密度等离子体、量子色动力学、晶体固态模型、分子行为的量子模型等，而常规计算机不可能有效地模拟量子系统，因为它们的物理机制不同，用常规计算机模拟量子系统，所需的信息量和时间都远大于模拟经典系统。



显的矛盾。起初，爱因斯坦试图寻找一个描述引力场变化的结构定律。他在狭义相对论的框架内处理引力定律，以期推出引力的场定律。可是，研究的结果却出乎意料：落体的加速度与它的内能有关。这让爱因斯坦认识到，在狭义相对论的框子里，不可能有令人满意的引力理论。

寻找第二个爱因斯坦

10 道有趣的问题

一封来自美国普林斯顿大学的电子邮件中，10道没有标准答案的物理研究课题将激活人们的无限想象。

你喜欢科学或者不喜欢，这都不要紧，但希望你总还有点热情和好奇心。

“好奇心”就是下一个爱因斯坦诞生的起点。

1. 让我有一个彩色的影子

每个人都有一个独一无二的影子，在印象中影子似乎只有一种黑色。世界上会有彩色影子吗？是否能依照自己的样子为自己设计出一个彩色

的影子呢？

2. 自制自行车里程计

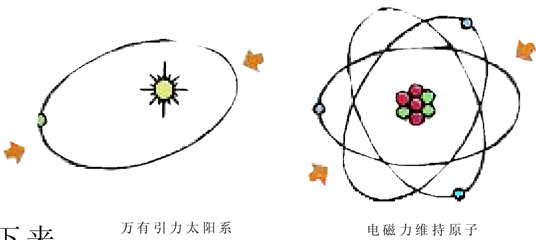
汽车都有里程表，我们能不能给自行车也装个里程表呢？如何用机械或电子的方法将自行车轮的每一次转动自动记录下来，并将其转换成公里数？

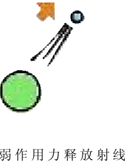
3. 自制一个能测液体密度的杆秤

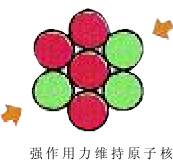
我们平时遇到的一些液态商品的质量可能同其密度有关。给你一根杆秤，外加一些小配件，如何才能方便地测出液体的质量呢？

4. 设计一个不受太阳位置变化影响的太阳灶

太阳能是一种绿色可再生能源，但用太阳灶加热物品有个麻烦，那就是相对太阳灶来说太阳的角度在不停地变化。能不能设计一种太阳灶，让太阳不论在什么位置都有一个同样的焦点呢？







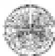
四种基本的力　合成图片

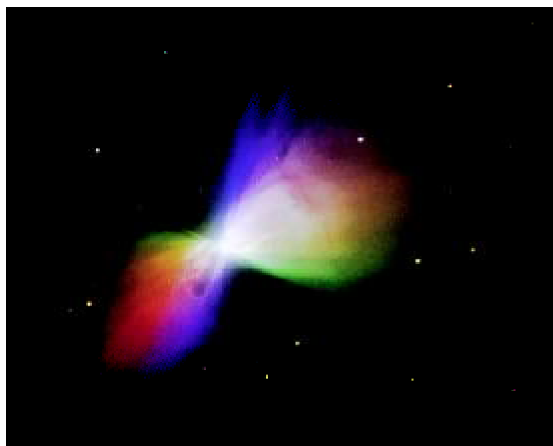
这幅图形象地描绘了物理学领域中所存在的四种力。

欧洲核子研究中心　摄影

始建于1954年9月的欧洲核子研究中心坐落在日内瓦附近，跨越法国和瑞士两国，是欧洲最大的高能物理研究机构。这是一个旨在探索“宇宙开始时最基本的东西是什么”等问题的纯科学的物理研究机构，也是当今世界上规模最大的科学实验室之一。

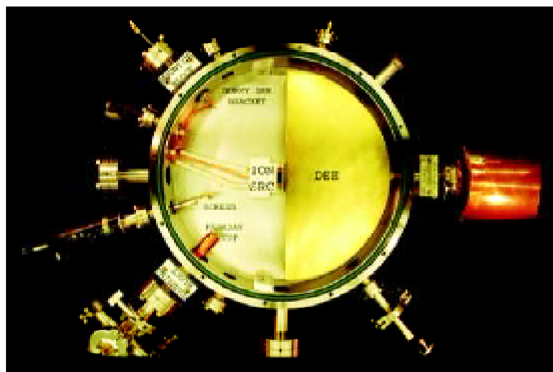






宇宙合成图片

我们现在观察到的宇宙，其边界大约有100多亿光年。它由众多的星系所组成。地球是太阳系的一颗普通行星，而太阳系是银河系中一颗普通恒星。我们所观察到恒星、行星、彗星、星系等是怎么产生的呢？宇宙学说认为，我们所观察到的宇宙，在其孕育的初期，集中于一个很小、温度极高、密度极大的原始火球。在150亿年到200亿年前，原始火球发生大爆炸，从此开始了我们所在的宇宙的诞生史。



回旋加速器　合成图片

回旋加速器之原理为利用磁场使运动中带电粒子回转，并利用电极间交错变换的正负电场，使粒子于回转中不断地获得能量。图中显示回旋加速器之基本构造，包含有加速电极、射频系统、气源、离子源、磁极、真空腔及导引电极等。

5．设计一套家庭节水方案

我国的水资源非常紧缺，节约用水是我们每个人的责任。作为一个家庭，如何用水更合理？

6．设计社区生活垃圾分配和回收方案

日常生活中会产生大量生活垃圾，有些有毒物会污染环境，能否利用各种垃圾不同的物理性质，设计一种分离装置方便地把垃圾分捡开来，将有用的部分回收，有毒的东西妥善处理呢？

7．设计一套以太阳能为主要能源的环保型家庭能源方案

作为一个现代人，又想环保又不想过原始人的生活。那么，一个现代化的家庭能否只用太阳能就可以生活呢？

8．设计一个自动关门装置

不用电机，不用弹簧，如何把开门的能量保存起一部分用来关门呢？

9．利用发光二极管设计一个不用电池的手电筒

发光二极管可是个好东西，发光效率高而且寿命还很长。让我们自己动手设计一个不用电池就能发光的手电筒吧。

10．设计一套调节吊车立柱高度的方案

你见过建筑工地上的吊车立柱吗？它的升降大有学问。请利用相关知识，设计一套让它随意长高或变矮的方案吧。

1.15 一般相对论的普通结果

在前面的论述中，我们清楚地表明，（特殊的）相对论从电气力学和光学发展而来。在电气力学和光学中，对于理论的预测，狭义相对论并未作太多的修改，但狭义相对论在相当程度上简化了理论的结构，即大大简化了定律的推导，然而最重要的是，狭义相对论大大减少了构成理论基础的独立假设的数目。狭义相对论使麦克斯韦—洛伦兹理论看来并非似是而非，所以即使没



斯塔克　摄影

斯塔克，1874 年出生在德国，是一位早年致力于核物理学研究的物理学家。作为物理学家，他早年极为推崇电学和放射学研究，认为这两门学科将主宰今后的世界文明。因而，早在 1902 年他就通过对放电管的研究，发表了关于气体中的电的论文，预言了“极隧射线”的高速原子应显示出多普勒效应。1905 年，他又用氢“射线”演示了这个效应。从 1910 年起，斯塔克转入对原子能研究。



附：

质量守恒定律

1756 年，俄国科学家罗蒙诺索夫把锡放在密闭容器内煅烧，锡发生变化，生成白色氧化锡。在精确的化学天平的帮助下，他发现容器和容器里物质的总质量在煅烧前后没有发生变化。以后又经过长达五年之久的无数次反复实验，都得到了同样的结果。这个善于思考、不迷信权威的俄国青年，用实验结果向他的德国导师沃尔夫教授的“燃素说”的错误观点发起了挑战。证明自然界存在着一条定律——质量守恒定律。这个定律是：化学变化只能改变物质的组成，但不能创造物质，也不能消灭物质；或者说参加化学反应的



法拉第　油画

迈克尔·法拉第（1791～1867），是 19 世纪电磁学领域中最伟大的实验物理学家，其最大的贡献是提出了场的概念。他反对超距作用的说法，设想带电体、磁体周围空间存在一种物质，起到传递电、磁力的作用，他把这种物质称为电场、磁场。1852 年，他引入了电力线（即电场线）、磁力线（即磁感线）的概念，并用铁粉显示了磁棒周围的磁力线的形状。场的概念和力线的模型，对当时的传统观念是一个重大的突破。

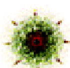


有实验给予明显的支持，这个理论也能使物理学家普遍接受。

经典力学必须经过改良才能与狭义相对论的要求相一致。但是此种修改大体上仅局限于对物质的速度，并且只对仅次于光速的电子和离子的高速运动定律有影响。至于其他运动，狭义相对论的结果与经典力学定律相差极微，而这种差异在实践中大都未能明确表现出

卡文迪什　雕塑

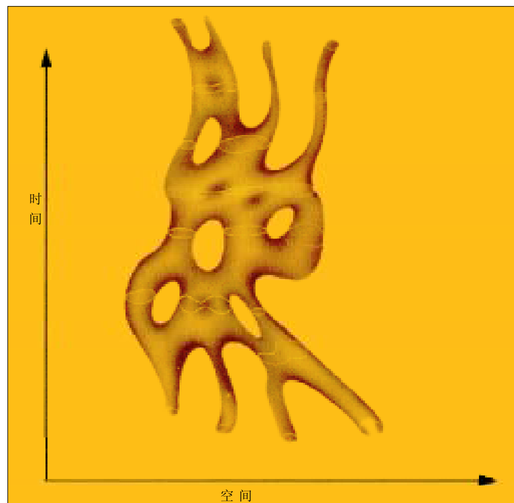
亨利·卡文迪什（1731～1810），是英国杰出的物理学家和化学家，他的一生为科学的发展作出了重要的贡献。卡文迪什的主要贡献有：1781年首先制得氢气，并研究了其性质，用实验证明它燃烧后生成水。



各物质的质量总和，等于反应后生成的各物质的质量总和。1777年，法国化学家拉瓦锡做了同样的实验，也发现化学变化前后物质的质量是守恒的。1908年德国化学家兰多尔特、1912年英国化学家曼利先后用天平精确研究了化学反应前后的质量关系，一致认定了质量守恒定律的正确性。

基本粒子

每个粒子都有着自己的生命值，随着时间的推移，粒子的生命值不断减小，直到粒子死亡（生命值为0）。一个生命周期结束时，另一个生命周期随即开始，有时为了使粒子能够源源不断地涌出，必须使一部分粒子在初始后立即死亡。



能量和能量守恒定律

世界是由运动的物质组成的，物质的运动形式多种多样，并在不断相互转化。正是在研究运动形式转化的过程中，人们逐渐建立起了功和能的概念。能是物质运动的普遍量度，而功是能量变化的量度。

这种说法概括了功和能的本质，但哲学味浓了一些。在物理学中，从19世纪中叶产生的能量定义——能量是物体做功的本领，一直延用至今。但近年来不论在国外还是国内，物理教育界却对这个定义是否妥当展开了争论。于是，许多物理教材，例如

来。在讨论广义相对论以前，星体的运动我们暂时将不予考虑。按照相对论，具有质量 m 的点的动能[1]不再由过去众所周知的公式

$$m\frac{v^2}{2}$$

来表达，而是由另一公式

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

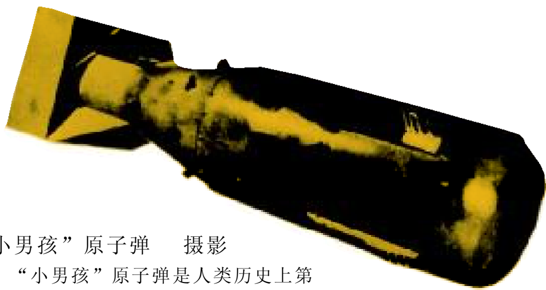
[1] 动能：物体由于做机械运动而具有的能量。在一般条件下，平动物体的动能等于 $mv^2/2$（m 为物体的质量，v 为物体的速度）。转动物体的动能等于 $I\omega^2/2$（I 是物体的转动惯量，ω 是它的转动角速度）。在速度接近光速 c 时，平转动能可用

$$\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-m_0c^2$$

表示（m_0 为物体的静止质量）。物体在外力作用下，若机械运动发生改变，其动能的增加（或减少）值等于外界对物体（或物体对外界）所做的机械功。

现行的中学教材，都不给出能量的一般定义，而是根据上述定义的思想，即物体在某一状态下的能量是物体由这个状态出发尽其所能做出的功，来给出各种具体的能量形式的操作定义（用量度方法代替定义）。

能量概念的形成和早期发展，始终是和能量守恒定律的建立过程紧密相关的。由于对机械能、内能、电能、化学能、生物能等具体能量形式认识的发展，以及它们之间都能以一定的数量关系相互转化的逐渐被发现，才使能量守恒定律得以建立。这是一段以百年计的漫长历史过程。随着科学的发展，许多重大的新物理现象，如物质的放射性、核结构与核能、

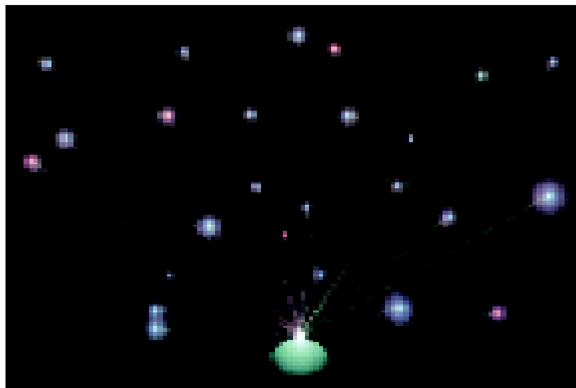


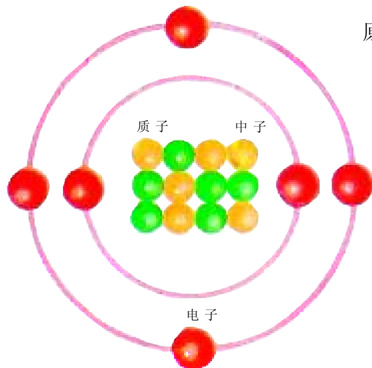
“小男孩”原子弹　摄影

“小男孩”原子弹是人类历史上第一颗原子弹，制造于美国，其制造理论根源也是来自爱因斯坦相对论原理。

可以确定的动态宇宙　合成图片

宇宙可能是膨胀的，也可能是收缩的，或者是脉动的。上世纪30年代，英国天文学家爱丁顿将哈勃发现的星系红移与宇宙膨胀理论结合了起来，认为哈勃的发现证实了宇宙膨胀理论。





原子核　示意图

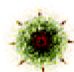
原子核是由带正电的质子和不带电荷的中子组成的，这幅图就是原子核的内部结构图。

来表达。

当速度 v 接近于光速 c 时，这个方程式接近于无穷大。因此，无论产生加速度的能量有多大，速度 v 必然小于 c。如果我们将动能的表示式以级数形式逐步展开，即得

$$mc^2+m\frac{v^2}{2}+\frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2}+\cdots$$

若 $\frac{v^2}{c^2}$ 与最小正数的 1 相比时是很小的，那么第三项与第二项相比也总是很微小，在经典力学中一般不计入第三项而只考虑第二项。速度 v 并不包含在第一项中，如果只对质点的能量如何依速度而变化的问题进行讨论，这一项也无须考虑。以后我们将叙述它本质上的意义。



各种基本粒子等被发现，给证明这一伟大定律的正确性提供了更丰富的事实。尽管有些现象在发现的当时似乎形成了对这一定律的冲击，但最后仍以这一定律的完全胜利而告终。

能量守恒定律的发现告诉我们，尽管物质世界千变万化，但这种变化绝不是没有约束的，最基本的约束就是守恒律。也就是说，一切运动变化无论属于什么样的物质形式，反映什么样的物质特性，服从什么样的特定规律，都要满足一定的守恒律。物理学中的能量、动量和角动量守恒，是物理运动所必须服从的最基本的规律。与之相较，牛顿运动定律、麦克斯韦方程组等都低了一个层次。

爱因斯坦　摄影

爱因斯坦是 20 世纪最伟大的科学家，他所提出的相对论原理直到现在仍在影响着物理学的发展，其对近代科学的发展有着不可磨灭的影响。



20 世纪以来，随着原子核科学的发展，科学家们发现物质的质量与能量相互联系着，把质量守恒与能量守恒联系起来，称为质能守恒定律。

质量的概念是狭义相对论中最普遍和最重要的结果。能量守恒和质量守恒定律是物理学中确认的两个具有基本重要性的守恒定律，在相对论创立前，这两个基本定律看上去好像是完全相互独立的，但相对论的出现将这两个定律结合为一个定律。这种结



牛津大学　摄影

牛津大学建立于13 世纪，世界十大学府之一，以美丽的大学城闻名全世界，童话故事——爱丽丝梦游仙境即以此地为故事背景。在牛津处处都是优美的哥德式尖塔建筑，因此有“尖塔之城”之称。牛津大学是英国第一所国立大学，培育出无数的顶尖杰出人士。该校包含36 个学院，除了各自有不同的建筑特色外，每个学院为独立自主的教学机构，提供学生课业及生活上的指导。

由于人们的思想长期束缚于传统观念，对崭新的时空观一时难以接受。爱因斯坦的论文发表后，在相当长一段时间内受到冷遇，遭到人们的怀疑和反对。在法国，直到1910 年，甚至没人提到过爱因斯坦的相对论。在实用主义盛行的美国，爱因斯坦的相对论在最初的十几年中也未曾得到认真对待。1911 年美国科学协会主席马吉说：“我相信，现在没有任何一个活着的人真的会断言，他能够想象出时间是速度的函数。”相对论的先驱马赫，竟声明自己与相对论没有关系，他“不承认相对论”。科学史学家惠特克在写相对论的历史时，竟然认为相对论的创始人应该是彭加勒和洛伦兹，爱因斯坦不过是在彭加勒和洛伦兹的基础之上做了一些补充。

1911 年，索尔威会议召开，人们才开始注意到爱因斯坦在狭义相对论方面所做的工作。但是，直到1919 年广义相对论得到日全食观测的证实，爱因斯坦成为万众瞩目的人物之时，狭义相对论才得到应有的重视。



基本粒子　合成图片

1897 年，汤姆逊发现了电子，它带有负电，电量与一个氢离子所带的电量相等。它的质量大约是氢原子质量的 1/1 800，它存在于各种物质的原子中，这是人类发现的第一个更为基本的粒子。其后，1911 年卢瑟福通过实验证实原子是由电子和原子核组成的。1932 年又确认了原子核是由带正电的质子（即氢原子核）和不带电的中子（它和质子的质量差不多相等）组成的。这种中子和质子也成了“基本粒子”。1932 年还发现了正电子，其质量和电子相同但带有等量的正电荷。由于很难说它是由电子、质子或中子构成的，于是正电子也加入了“基本粒子”的行列。

合是如何实现的，并且会有什么意义，我们将进行简单的考察。

按照相对性原理的要求，能量守恒定律不仅对于坐标系K，而且对于每一相对于K做匀速平移运动的坐标系K'都是成立的，或者简单地说，对于每一“伽利略”坐标系都应该能够成立。与经典力学相比较，洛伦兹变换是从一个坐标系过渡到另一个坐标系时的决定性因素。

通过相对比较简单的思考，我们可以根据麦克斯韦电气力学的基本方程并结合上述前提得出这样的结论，如果一物体以速度v运动，在以辐射[2]的形式吸收能量E_0的过程中不改变速度的情况，该物体因吸收而增加的能量为

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

考虑到物体的动能表示式，得到所求的物体能量为

$$\frac{\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

于是，该物体所具有的能量与一个质量的公式就为

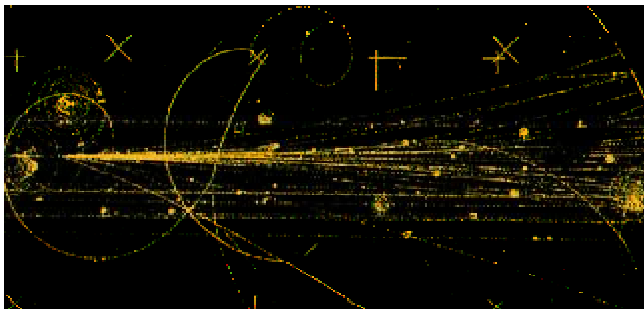
$$m+\frac{E_0}{c^2}$$

因为速度v的移动，因此我们可以说：如果一物体吸收许多能量E_0，那么它的惯性质量应该增加的一个量：$\frac{E_0}{c^2}$。

由此看来，随物体能量的改变而改变的惯性质量并不是一个恒量，惯性质量可以被认为是一个物体的能量的量度，于是物体的质量守恒与能量守恒定律便成为同一，而且质量守

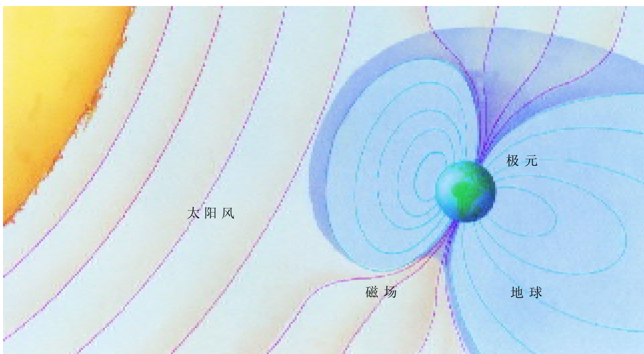
亚原子粒子　合成图片

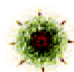
亚原子粒子指的是小于原子的粒子，即基本粒子或原子核。质子、中子和电子只是构成原子的200多种亚原子粒子中的三种。科学家还在不断地发现新粒子。他们使用功率很大的，被称为粒子加速器的机器使原子和亚原子粒子在高速下碰撞，来制造其他的亚原子粒子。他们为这种粒子取名k介子、v粒子、λ粒子等等。



太阳风　合成图片

太阳风指的是从太阳大气最外层的日冕，向空间持续抛射出来的物质粒子流。很早以前，人们看到彗星的尾巴老是背着太阳，猜想这大概是从太阳“吹”出来的某种物质造成的。1958年，通过人造卫星上的粒子探测器，探测到了太阳上有微粒流发出。美国科学家帕克给它取名为“太阳风”。





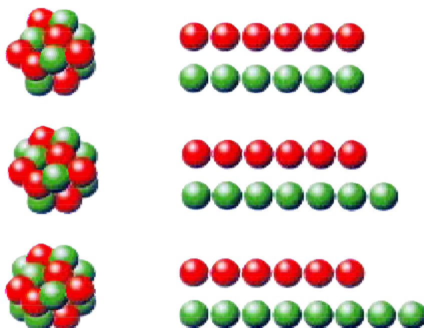
恒定律只有在物体既不吸收也不释放能量的情况下才是有效的。下面将能量的表示式写出：

$$\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

我们看到其中的条件 mc^2，一直在吸引我们的注意，而它只不过是物体在吸收能量 E_0 以前原来具有的能量。

目前（指 1920 年），要观察到一个物体所发生的能量变化 E_0 大到足以引起惯性质量的变化是不可能的，因此要将这个关系式与实验直接比较也是不可能的。与发生能量变化前已存在的质量 m 相比较，$\frac{E_0}{c^2}$ 实在是太小了。正是基于这种情况，质量守恒才在经典力学中被确立为一个具有独立有效性的定律。

最后，让我就自然基本法则再谈论几句。法拉第一麦克斯韦解释的电磁超距作用[3]的成功使物理学家确信，完全没有瞬时超距作用（不包括中间媒介），比如牛顿万有引力定律类型。按照相对论，瞬时超距作用总是被光速传播的超距作用代替，也就是以无限大速度传播的超距作用。速度 c 在相对论中扮演的基本角色的重要性与这点有关，本书的第二部分，我们将看到广义相对论是如何修改这一结果的。



中子　合成图片

中子不带电荷，是组成原子核的粒子之一，穿透能力极高，只有水或石蜡这些含有大量氢原子的物质，可以阻隔中子。核电站的核反应堆中，核裂变会产生高速移动的中子，通常是用水去阻隔及控制中子的移动速度。



费曼　摄影

美国物理学家费曼是 20 世纪最伟大的科学家之一。他生性好奇、兴趣广泛、多才多艺、特立独行，被誉为“科学的魔术师”。在“曼哈顿计划”期间，他以破解保险柜的密码自娱，来提醒管理人员注意安全。1965 年他被授予诺贝尔奖，曾试图谢绝这项荣誉。他喜欢去酒吧享受生活的乐趣，却在那里得到启发找到了创立量子电动力学的方法。

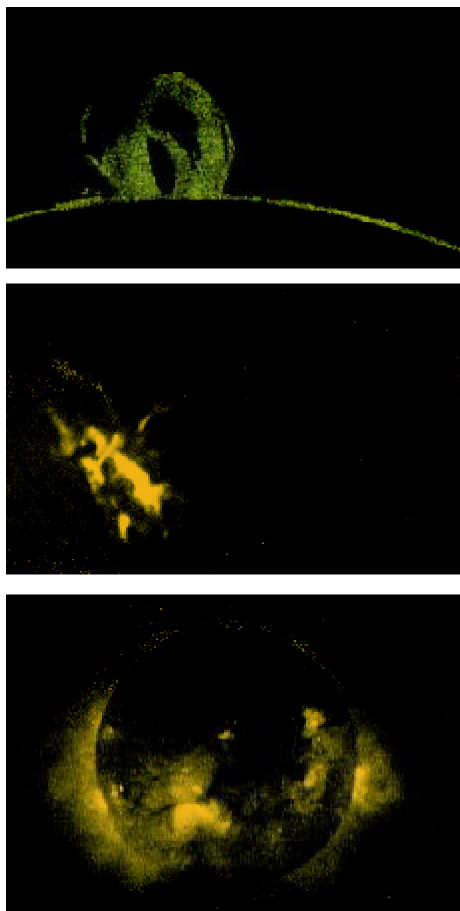


[2] 辐射：波动（机械波或电磁波）或大量微观粒子（如质子或 α 粒子）从它们的发射体出发，在空间或媒质中向各个方向传播的过程。也可以指波动能量或大量微观粒子本身。

[3] 超距作用：对于不相接触的物体间发生相互作用的一种错误解释。认为：这种相互作用，如地面上物体所受的重力、两电荷间的吸力或斥力等，与存在于两物体间的物质无关，而是以无限大速度在两物体间直接传递的。这种解释与事实并不相符，后来在大多情况中能够证明，一个物体发生的作用需要一定的时间才能达到另一个物体，而且如果其间物质不同，所需时间也不同。法拉第首先由此得出结论：不相接触的物体间的相互作用不是直接传递，而是通过中间的媒质以有限速度传递的。这种形式的相互作用称为“媒递作用”，是场的概念的起源。

1.16 经验和狭义相对论

狭义相对论有多大程度能得到经验的支持呢？这是个不容易回答的问题，而理由已经在阐述斐索重要的实验时已经讲过。从麦克斯韦和洛伦兹关于电磁现象的理论中演化出狭义相对论，它因而得到了所有支持电磁理论的实验的支持。在此我要说明的具有特别重要意义的是，相对论使我们以极其简单的方



X 射线　合成图片

1895 年 11 月 8 日德国维尔茨堡大学物理研究所所长伦琴发现了 X 射线，自 X 射线发现后，物理学家对 X 射线进行了一系列重要的实验，探明了它的许多性能，根据狭缝的衍射实验，索末菲教授指出，X 射线如是一种电磁波的话，它的波长应当在 0.1 纳米上下。

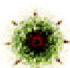
附：

在本节中，爱因斯坦认为，所有支持电磁理论的经验事实也都支持相对论，相对论不仅能够预示从恒星传到我们这里的光所产生的效应，而且还能够推导出电子的外形由于电子运动的缘故而在运动的方向发生收缩的运动定律。最关键的是，与洛伦兹收缩假说相比，相对论还能更为令人满意地解释以太漂移实验的零结果，然后宣称造成这种收缩的首要因素并不是运动本身，而是对于参考物体的相对运动。



扭曲的蛇　合成图片

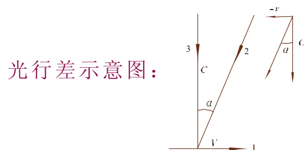
20 世纪数学方面最令人惊叹的成果就是拓扑学——研究扭曲或拉伸的物体表面。它的发展是受到高斯未发表的结的理论的启发。有时也称“橡胶皮”几何学。任何由于弯曲、扭曲或拉伸而变化的新形状在拓扑学看来都是一样的，但经过剪切、撕裂后的形状就不一样了。



式获得了地球对恒星的相对运动的说明，并且也预示了从恒星传到地球的光所产生的效应，而这些已判明与我们的经验相符合，即地球每年绕日运动产生了恒星视位置的周年运动（光行差[1]），以及恒星对地球的相对运动的径向分量从恒星传到地球后，对光的颜色产生了影响。这一结果表明，从恒星传播到地球的光的光谱线与地球上相同的光谱线的位置相比，确实有微小的移动（多普勒原理）。这样看来，同时支持麦克斯

[1] 光行差：由于地球的运动，观测者所看到的天体的方向，不是它真实的方向，而是地球的速度和来自天体的光的速度合成的方向，这两个方向之间的差叫做“光行差”。它有两种：一是周年光行差，由地球的公转所引起；二是周日光行差，由地球的自转所引起。

光行差示意图：



c 光速；v 观测者的运动速度；α 光行差角；
1．观测者的运动方向；2．星光的视方向；
3．星光的真方向。

反对意见

有人提出反对意见。他们认为，有经验事实的支持并不等于其假说就一定正确。在地球上或在伽利略大船中做以太漂移实验时，因为在光源与观察者及所谓的“以太”之间并无相对运动，所以，相对论的解释非常多余。而在谈论电子时，因为我们根本看不到电子的外形，所以，相对论的推导无法验证。至于在观测光的多普勒效应时，因为在光源与观察者之间有相对运动才会产生光谱频移，所以相对论的预示是完全错误的。

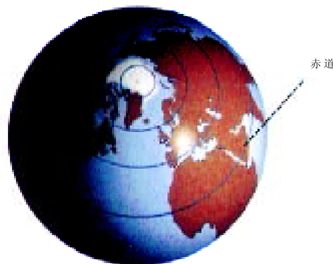
由此可见，原本只是论动体波动的相对性问题的狭义相对论假说，在实际上非但并无任何经验事实的支持，反而仅仅用光的多普勒效应的经验事实就可以完全彻底地被否定：



北半球



南半球

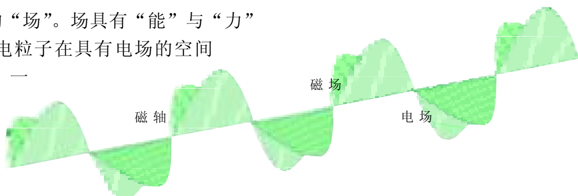


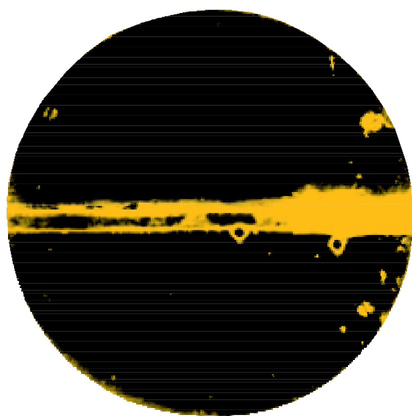
地球　合成图片

从数学的观点来看，我们不能只用一张地图将地球的表面覆盖，我们至少需要两张部分相重叠的地图。类似地，人们也不能用同一种理论对物质提供单独的表述，人们必须在不同情形下，使用不同的表述。

电场与磁场　合成图片

电场是“带电粒子”在空间中所建立的“场”。场具有“能”与“力”的性质，由于电是一种力场，因此其他带电粒子在具有电场的空间中将具有“势能”并受到一定的“作用力”。一般来说电场是指电荷静止时所产生的场，所以有时也称静电场。运动的电荷被称为电流，会产生电场和磁场。电场和磁场统称为电磁场。



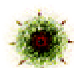


正电子　合成图片

1932年8月2日，美国加州工学院的安德森等人向全世界庄严宣告，他们发现了正电子。所谓正电子，是指质量、带电量与电子完全相同，但带正电的粒子，最早是由狄拉克从理论上预言的。其实在安德森之前，曾有一对夫妇科学家——约里奥·居里夫妇（皮埃尔·居里夫妇的女婿与女儿）首先观察到正电子的存在，但他们并未引起重视，从而错过了这一伟大发现。

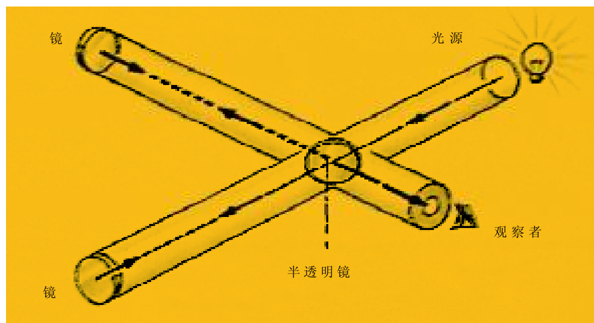
韦—洛伦兹理论和相对论的实验论据实在是多不胜数。事实上，这些论据对可能性理论的限制程度，恐怕只有麦克斯韦和洛伦兹的理论才能经得起检验。

但是有两类已获得的实验事实，如果要用麦克斯韦-洛伦兹的理论来表示，则必须引进一个辅助假设，当然，这个辅助假设就其本身而论，不引用相对论的话，似乎不能与麦克斯韦—洛伦兹理论相联系。



因为随时随地产生的波与波源之间根本无速度相加不变的相对性关系，所以才有“双星实验”等相对波源的光速不变的经验事实；又因不需要传播介质的波与真空之间虽然有速度相加可变的相对性关系，但由于真空并无运动速度，而有“以太漂移实验”零结果的光速不变的经验事实；还因在静止的介质或真空中恒速传播的波或光与参考系或观察者之间肯定是速度相加协变的相对性关系，所以就有相对观察者的光谱频移效应的经验事实。

因此，相对论的谬误根源，仅仅是假设光源与介质及其参考系或观察者之间都服从速度相加不变的“光的传播定律”，也就是爱因斯坦始终不敢直接给出公式的“光速不变原理”。如此说来，爱因斯坦虽然在提出其相对性假说时，可能没注意到这一公式（即当 $v\neq0$ 时 $c+v=c$ 成立）在数学上是根本不成立的经验事实，但在浅说其荒谬性思想时则肯定是注意到了这个将导致相对论灭亡的经验事实的，



迈克尔逊—莫雷实验　合成图片

光照射到半透明的镜子上，接着又被反射到另一面镜子上，接着光束按照直线运动又反射到第三面镜子上。两道重叠的光都射进观察者的眼睛里。一般来说，观察者先看到的是时亮时暗的干涉条纹。鉴于仪器的两支镜管长度相同，因此可以根据条纹的差距测出两个方向的光速之间的差别。迈克尔逊和莫雷希望通过这种方式测量出南北方向的光速和东西方向的光速之间的差别。

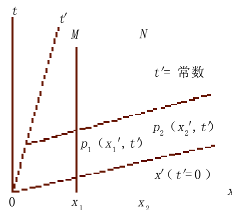
众所周知，阴极射线[2]和放射性物质发射出来的射线[3]是由惯性很小但速度很大的带负电的粒子[4]（电子[5]）构成。检查此类射线在电

[2]阴极射线：在抽空的气体放电管或电子管中，由阴极发出的电子在电场加速下所形成的电子束流。在放电管中，阴极由于受到管内剩余气体中正离子的撞击而发射电子，在电子管中则由于受到电流加热而发射电子。阴极射线应用很广，它能使被照射的某些物质发出荧光，在外加电磁场中又能迅速随着场的变化而发生偏折，电子示波器中的示波管和电视机中的显像管，均依此原理制造；高速阴极射线照射金属板时，能产生x射线；利用电子的波动性质，阴极射线还可用以研究物质的结晶构造。

[3]射线：在数学上，指从一个定点出发沿一个定向运动的点的轨迹；在物理学中则为物理学的一个术语，如x射线、阴极射线等。

[4]粒子：曾称“基本粒子”。泛指比原子核小的物质单元，包括电子、中子、质子、光子，以及在宇宙射线和高能物理实验中发现的一系列粒子。已经发现的粒子有30余种，连同共振态共有300余种。每种粒子都有确定的质量、电荷、自旋、平均寿命等。多数粒子是不稳定的，在经历一定平均寿命后转化为别种粒子。粒子有的是中性的，有的带正电或负电，电量大小与电子相同。它们的质量大小有很大差别，一般可按其质量大小及其他性质的差异而把粒子分为光子、轻子、介子、重子（包括核子、超子）四类。

所以才从欧氏几何、经典力学、伽利略变换到洛伦兹变换、电动力学及非欧几何，再从狭义相对论到其广义相对论，最后从整体宇宙的考察到弯曲时空的理论都阐释了，唯独不谈这一简单得连“学校里的儿童”都能确认其不成立的算术公式。其目的无非是不愿让“这个简单的（错误）定律使思想缜密的物理学家陷入智力上的极大的困难之中”解脱出来而已。



洛伦兹收缩　示意图

1892年洛伦兹研究过地球穿过静止以太所产生的效应，为了说明迈克尔逊—莫雷实验的结果，他独立地提出了长度收缩的假说，认为相对以太运动的物体，其运动方向上的长度缩短了。1895年，他发表了长度收缩的准确公式。1899年，他在发表的论文里，讨论了惯性系之间坐标和时间的变换问题，并得出电子与速度有关的结论。1904年，他发表了著名的变换公式（J.-H.庞加莱首先称之为洛伦兹变换）和质量与速度的关系式，并指出光速是物体相对于以太运动速度的极限。

爱因斯坦生命中的重要符号

原子弹

虽然爱因斯坦经常被人称作是“原子弹之父”，但其实他同原



原子弹爆炸　摄影

原子弹爆炸的能量非常惊人，而且爆炸后还产生大量的放射性物质，因此是当今世界上最具杀伤力的非常规武器。图为原子弹爆炸时所产生的特有的蘑菇云。

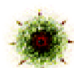
场[6]和磁场[7]影响下的偏斜，我们就能够非常精确地研究出这些粒子的运动定律。

电子的本性并非是电气力学所能解释的，这使得我们在用这种理论描述电子时遇到了困难。由于电子的相互排斥性，构成电子的负电及正

[5] 电子：最早发现的粒子。带负电，电荷量为 $1.602\ 117 \times 10^{-19}$ 库，是电荷量的基本单元。质量为 $0.910\ 938\ 97 \times 10^{-30}$ 千克。常用符号 e 表示。1897 年英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆生在研究阴极射线时发现，一切原子都由一个带正电的原子核和围绕它运动的若干电子组成。电子的定向运动形成电流。

[6] 电场：传递电荷与电荷间相互作用的物理场。电荷周围总有电场存在；同时电场对场中其他电荷又有力的作用。观察者相对于电荷静止时所观察到的电场称“静电场”。电荷和观察者有相对运动时，则不仅有电场，还有磁场出现。除电荷可产生电场外，变化的磁场也可产生电场。

[7] 磁场：传递运动电荷、电流之间相互作用的一种物理场。由运动电荷或电流产生，同时对场中其他运动电荷或电流发生力的作用。运动电荷、电流之间的相互作用是通过磁场和电场来传递的。永磁体之间的相互作用只通过磁场传递，但近代理论指出，永磁体的磁性也是由分子电流引起的。变化的电场也产生磁场，磁场是统一的电磁场的一个方面。



子弹之间并无任何直接关系。看看他本人是如何说的：“我不认为我自己是释放原子能之父。事实上，我未曾预见到原子能会在我活着的时候就得到释放。我只相信这在理论上是可能的。”广岛和长崎原子弹爆炸后，他还为反对原子战争而奔走呼吁。

爱因斯坦和他的妻子　摄影

1931 年新年前夕，爱因斯坦携妻子艾尔莎访问美国加利福尼亚的圣地亚哥，两年后他永远地定居这个国家。



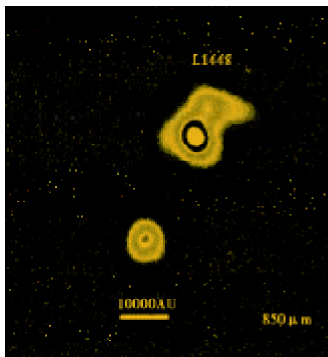
黑　洞

爱因斯坦的广义相对论指出，引力场可以造成空间弯曲。理论物理学家据此推导出，引力场的极致会使时空变得无限弯曲，从而使光不能逃逸，这就是“黑洞”。爱因斯坦本人并不相信黑洞的存在，但以霍金为首的物理学家却用越来越多的证据表明，那个吞噬一切的黑洞，并非传说。

中　国

1922 年，爱因斯坦应日本改造社邀请赴日本讲学，来回两次途经上海。正是在上海，他被告知获得诺贝尔物理学奖的消息。中国人看到的爱因斯坦

电在其本身的影响下必然会分散，否则在它们之间一定有另外一种力存在，但这种力的本性迄今为止我们还不清楚。如果我们现在假定组成电子的质量相互之间的相对距离在电子运动的过程中始终保持不变（即经典力学中的刚性连接），我们得出的电子运动定律就与经验不相符合。这一根据纯粹的形式观点引进下述假设的领路人是H. A. 洛伦兹，他假设由于电子运



远红外线　合成图片

远红外线是指波长在3~1 000微米的红外线，科学研究表明，对人体有益无害的是占太阳能量60%的不可见红外光，其中波长5.6~15微米这一波段的红外线对人类的生存与万物的生长极为重要。生命科学研究证实，人体本身是一个远红外辐射源，他可以吸收及发射远红外光，所以当远红外线照射人体时，其频率与身体中的细胞分子、原子间的水分子运动频率相一致时，引起共振效应，其能量最高且能被生物体所吸收，使皮下组织深层部位的温度升高，产生的热效应使水分子活化，处于高能状态，加速人体需要的生物酶的合成，同时活化蛋白质等生物分子，从而增强机体免疫力和生物细胞的组织再生能力，加速供给养分和酵素，促进身体健康。

赫斯　摄影

赫斯因1911年发现宇宙射线而成名。原先对于这种辐射的性质相当不确定，一直到了1936年赫斯与其他科学家（如密立根）才确定此系来自外层空间的宇宙射线，赫斯因而荣获1936年诺贝尔物理奖。他又研究宇宙射线的生物效应、季节性的变化，以及其强度受到磁场扰动的影响。



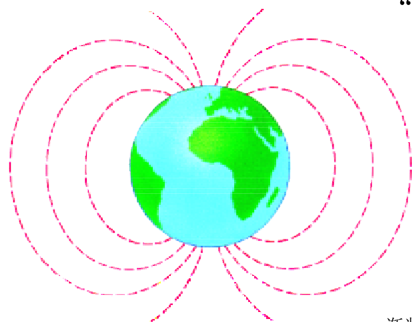
是这样的：一个相貌平凡而和蔼的绅士，看起来更像一位乡村牧师。他对当时中国人的印象则是“勤劳、善良、备受挫折、鲁钝、不开化——然而健全”。

微分几何

微分几何是爱因斯坦广义相对论不可或缺的数学工具。在微分几何的世界里，平行线可以相交，直角可以弯曲。

艾尔莎

爱因斯坦的第二任妻子。与他的第一任妻子米列娃性格完全不同，“她是一个身宽体胖的女人，生气勃勃。她坦然高兴地做身边这个伟人的妻子，丝毫不隐藏这一事实”(卓别林语)。但爱因斯坦与她匆匆结婚，最后却仍然发现



地球磁场　示意图

地球强大的磁场是保护人类免于遭受外太空各种致命辐射的生死屏障。地球产生磁场的地心熔铁在地球两极处形成了两个巨大的漩涡。这些旋转着的漩涡增生和扩散后产生的新磁场，将逐渐削弱和抵消原来的主磁场。



电子散射　合成图片

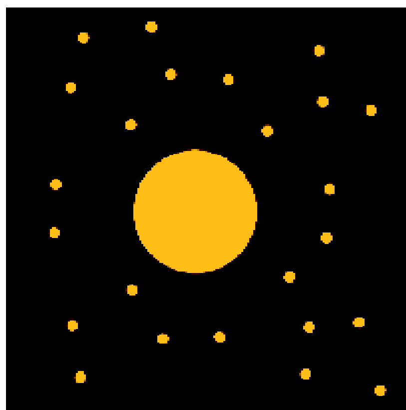
电子散射分为弹性散射和非弹性散射两种，其中弹性散射的角分布等可以用Mott截面来求得。描述电子非弹性散射的若干基本物理量，如微分散射截面、平均自由程和阻止本领等可以由固体的介电函数求出，依存于波矢的体介电函数由光学常数的实验值得到。

动的缘故导致电子的外形在运动的方向发生收缩，收缩的长度与$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$成正比。这一假设没被任何电动力学的事实所证明，但却使我们得到了一个特别的运动定律，这一运动定律在近年来被相当高的精确度所证实。

相对论导致了同样的运动定律，它不需要电子结构和行为的任何特殊的假设。本章第十三节我们在结束斐索的实验时也得出了相似的结论，实验的结果被相对论的预言所证实，我们不需要引用关于液体的物理本性的假设。

我们的第二类事实涉及到地球在空





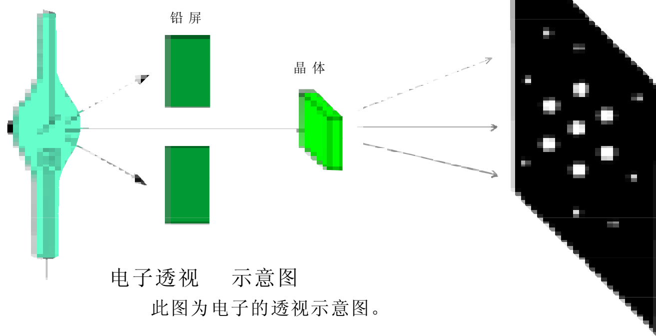
这是个失败的婚姻。

自　由

关于自由，爱因斯坦曾多次引用有人对海涅的评论："他为上帝效劳，这个上帝比所有奥林匹亚诸神都更伟大。我指的是自由上帝。"为争取学术自由，针对上世纪50年代美国政府推行的政治迫害和破坏科学自由交流的政策，他说："我宁愿做一个管子工。"为争取公民自由，他说："公民自由意味着人们有用语言表达自己政治信念的自由。"

上　帝

爱因斯坦曾严肃地表示："我信仰斯宾诺莎的那个在存在事物的有秩序的和谐中显示出来的上帝，而不信仰那个同人类的命运和行为有牵连的上帝。"



电子透视　示意图

此图为电子的透视示意图。

好莱坞

好莱坞电影特效的神奇让爱因斯坦赞叹不已，而他也有自己的明星

间中的运动能否用地球上所做的实验来观察这一问题。本章第五节我们已谈过，所有关于这类问题所做的努力的最后结果都被否定了。在相对论提出以前，人们对于这个否定的结果很难接受，现在我们来讨论一下其中的原因。



爱因斯坦获得诺贝尔奖的证书和奖章　摄影

爱因斯坦因为其光子理论获得1921年的诺贝尔物理学奖，尽管这项成就的价值无可争议，但是很多人认为爱因斯坦的相对论成果更重要些。

基于对时间和空间的传统偏见，人们对从一个参考物体变换到另一个参考物体并始终占有首要地位的伽利略变换不容许有任何的怀疑。假设麦克斯韦-洛伦兹方程对于一个参考物体 K 成立，坐标系 K 和相对于

崇拜者，比如玛丽·碧克馥。他还非常推崇卓别林的电影。一次，他在给卓别林的一封信中写道："你的电影《摩登时代》，世界上的每一个人都能看懂。你一定会成为一个伟人。"卓别林在回信中写道："我更加钦佩你。你的相对论世界上没有人能弄懂，但是你已经成为一个伟人。"

犹太人

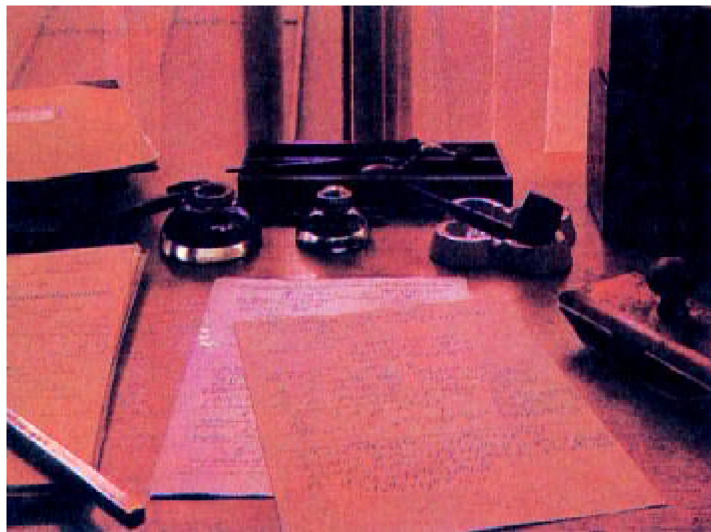
1879年3月14日，爱因斯坦出生于德国乌尔姆的一个犹太人家庭。因为这一身份，1933年，希特勒上台后，他被迫永远地离开了德国。

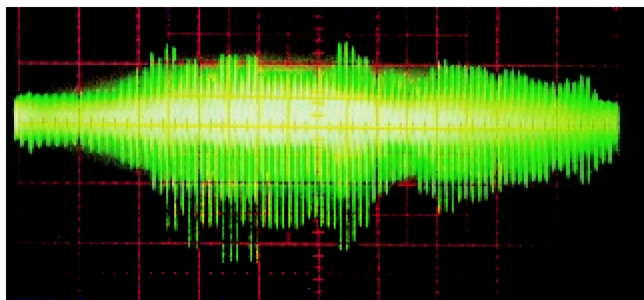
信

爱因斯坦年轻时喜欢给女孩子写"打油情书"，在1899年夏天，20岁的他在苏黎世度假时结识了一家旅馆主人的小姨

爱因斯坦在普林斯顿大学的房子　摄影

1932年，爱因斯坦受聘于美国普林斯顿大学，1933年后，爱因斯坦一直待在普林斯顿大学，直到1955年去世。图为爱因斯坦居住的房子。

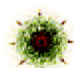




示波器　合成图片

示波器又称阴极射线示波器，是一种用途极为广泛的电子仪器。它可用于观测和测量随时间变化的电信号波形，进行电信号特性测试包括频率、相位、电压（或电流）和功率等，凡是能转化为电压的电学量（电流、功率、阻抗）和非电学量（如温度、位移、速度、压力、光强、磁场等）都可以用示波器进行测量。在工业上常用示波器探伤和检验产品质量，医学上用示波器诊断病灶。至于无线电制造工业和电子测量技术等领域，示波器更是不可缺少的测试设备。

K 做匀速运动的坐标系 K' 存在着伽利略变换，那么，这些方程相对于 K' 就不能成立。由此可见，在所有伽利略坐标系中，特别运动状态的坐标系 K 必然是该系统所对应的，并且具有物理的唯一性。物理上的解释是：K 相对于假定空间中的以太[8]是静止的，另一方面，所有相对于 K 运动的坐标系





米列娃　摄影

米列娃生长在奥匈帝国的官宦之家。她的天分很早就被发现，因此老师让她在男校读完中学，然后再送至德国海德堡，最后和爱因斯坦同年进入苏黎士综合技术学校。

子安娜·施密德，并应邀在她的照片簿上写道：

姑娘你小巧又美貌
我为你题点什么好？
我会想到好多事
也包括一个小亲亲
落在你那小秀唇
你若因此而生气
可别立即就哭泣
惩罚我的最佳办法
就是还给我一个吻

米列娃

米列娃·玛丽奇是爱因斯坦的第一任妻子。人们所知的是，1919 年，爱因斯坦与她协议离婚，两年后她得到了爱因斯坦一部分的诺贝尔奖金；不知道的是，她本人曾是欧洲第一个学数学的女大学生，为了丈夫的事业，她放弃了自己的爱好，全心全意支持丈夫。由于性格不和，她最终没能和爱因斯坦相伴一生。

诺贝尔奖

除了1911 年和1915 年，从1910 年到1922 年，爱因斯坦每年都获得诺贝尔物理学奖提名，但直到1922 年他才终偿所愿，而获奖原因并不

K'被认为都在相对于以太运动，由于K'相对于以太运动（相对于K'的"以太漂移"），因此曾假定为对于K'能够成立的运动定律就比较复杂。严格地讲，这样的以太漂移相对于地球来说应该假定是存在的。因此，物理学家们对探测地球表面上是否存在以太漂移的工作曾付出几个世纪的努力。

这些努力中最值得注意的是迈克尔逊设计的一种具有决定性意义的方法。我们假定在一个刚体上安置两面镜子，使镜子的镜面彼此面对，如果整个系统相对于以太是静止的，那么光线从一面镜子射到另一面镜子然后再反射回来就需要一个确定的时间T。根据计算推出，如果该刚性

[8] 以太：古希腊哲学家所设想的一种媒质。17 世纪时为解释光的传播，以及电磁及引力现象又重新提出。当时认为：光是一种机械弹性波，其传播媒介是某种弹性介质，即以太。它无所不在（包括真空和任何物质内），没有质量，但有极大的刚性，而又"绝对静止"。但 20 世纪以来所有寻找以太的实验都归于失败。



是大名鼎鼎的相对论，而是"光电效应定律的发现"。

总　统

1952 年 11 月 9 日，以色列总统魏茨曼去世后，以色列总理古里安作出了一个惊世骇俗的决定：邀请爱因斯坦担任以色列总统。虽然爱因斯坦备感荣幸，但还是拒绝了，他解释说他年纪太大了，也没有经验，不能胜任总统。

量子理论

爱因斯坦在 1905 年提出的光量子理论被视为开创早期量子论的重要文章。

相对论

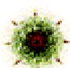
在爱因斯坦以前，牛顿力学的经典力学认为，时间和空间都是绝对的。1905 年爱

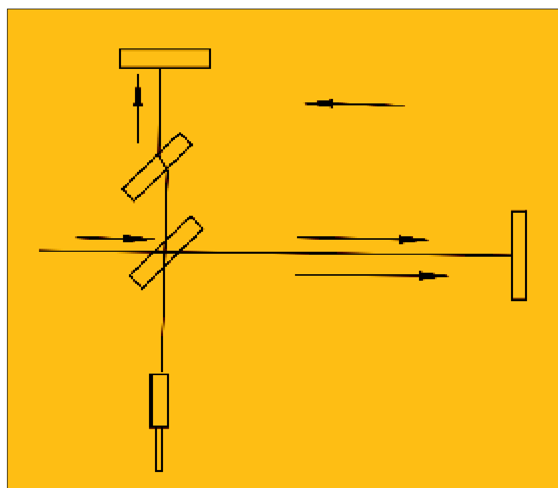
迈克尔逊干涉仪

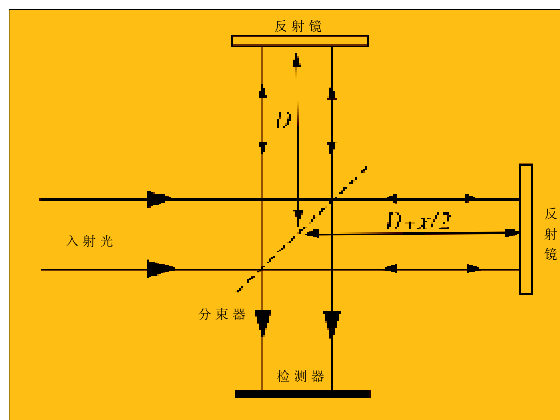
迈克尔逊为了研究光速问题而精心设计了干涉仪。它是一种分振幅的干涉装置，它将一路光分解成相互垂直的两路相干光，然后通过反射再重新汇聚在另一个方向上。基于其结构原因，它是光源、两个反射镜、接收器（屏或眼睛）四者完全分立，东南西北各据一方，便于光路中安插其他器件。如利用白光测玻璃折射率，测定气体折射率等。迈克尔逊干涉仪可以使等厚干涉、等倾干涉及各种条纹的变动做到非常易于调整，很方便进行各种精密测量。它的设计精巧，用途广泛，在许多科研领域都有它的身影。



参照物与镜子相对于以太是运动的，则这一过程就有一个与确定的时间 T 略微不同的 T'。另外，计算表明，如果规定 v 是相对于以太运动的速度，则相对于镜子垂直平面运动的 T' 又与相对于镜子平行平面运动的 T' 又不相同，虽然它们的时间差别极其微小。不过，在迈克尔逊和莫雷利用光的干涉的实验中，完全否定了本应清楚观察得到的这两个时间的差别，这种否定让物理学家感到极为困惑。后来，洛伦兹和斐索所做的实验从困惑的局面中把理论解救了出来：物体相对于以太运动，假若使物体沿运动方向发生收缩，而这种收缩产生的量恰好足以补偿时间上的差别。如果与本章第十二节相比较，我们可以指出：从相对论的观点来看，这种解决的方法或许是对的。但是要其解释的方法更能使人信服，则必须要以相对论为基础。按照相对论，没有什么以太漂移，也不会出现演示以太漂移的任何实验，因为并没有“特别卓越的”（唯一的）坐标系可以用来作为引进以太观念的理由。在这里，相对论的两个基本原理推导







因斯坦提出，物体匀速运动时，质量会随着速度增加而增加，空间和时间都会发生相应变化，发生尺缩效应和钟慢效应，这就是狭义相对论。

从1907年到1915年，他又用八年时间将其从匀速直线运动扩展到非惯性系中，创立了广义相对论。

小提琴

爱因斯坦从9岁起开始学小提琴，尽管他小时候不太

（上）迈克尔逊与莫雷实验　示意图

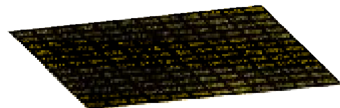
1887年美国物理学家迈克尔逊与莫雷一起利用干涉仪做了著名的“迈克尔—莫雷实验”。证明了光在不同方向上都相同。对于这个重要的判断爱因斯坦给予了高度评价。

（下）迈克尔逊干涉仪原理　示意图

迈克尔逊干涉仪是利用干涉条纹精确测定长度或长度改变的仪器，它是迈克尔逊在1881年设计成功的。迈克尔逊和莫雷应用该仪器进行了测定以太风的著名实验。后人根据此种干涉仪研制出各种具有实用价值的干涉仪。

出了运动物体的收缩，而并没引进任何特定的假设。至于造成收缩的主要因素并不是运动本身（我们不能赋予运动本身任何意义），而是相对于在具体实例中选定的参考物体的相对运动。例如，如果一个坐标系与其相对物地球一起运动，则迈克尔逊和莫雷的镜面系统并没有缩短，但如果对于相对于太阳保持静止的坐标系来说，这个镜面系统的确缩短了。







宇宙模型　合成图片

对宇宙的大尺度时空结构、运动形态和物质演化的理论描述。又称模型宇宙。按照宇宙大尺度结构，有两种不同的模型：均匀模型，即认为大尺度上物质的分布基本上是均匀各向同性的，满足宇宙学原理；另一种是等级模型，认为天体的分布是逐级成团的，物质分布在任何尺度上都具有非均匀性。

喜欢这个出自母亲的安排，但成年后，音乐却成了他最忠实的伴侣。他喜欢莫扎特、巴赫、舒伯特、亨德尔和维瓦尔第，几乎没有一天不拉小提琴。他经常演奏的小提琴名叫“莉娜”。

波

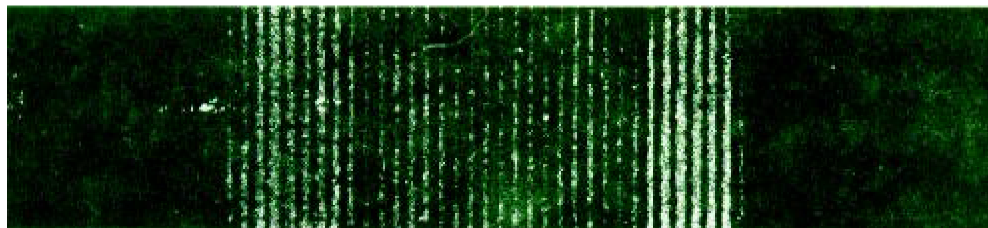
光是一种波还是一束粒子？从牛顿和惠更斯时代起，物理学界关于“微粒说”与“波动说”的激烈争论就没能停息过。1905 年，为了解决麦克斯韦电磁学理论与经典力学之间的矛盾，爱因斯坦提出了光量子理论，揭示了光的波粒二象性。

奇迹年

1905 年，爱因斯坦接连发表了五篇开创性的论文，从而使这一年成为牛顿经典物理学与现代物理学的分水岭，因此，这一年被称为“奇迹年”。

光的干涉　合成图片

光的干涉是指满足一定条件的两列相干光波相遇叠加，在叠加区域某些点的光振动始终加强，某些点的光振动始终减弱，即在干涉区域内振动强度有稳定的空间分布。





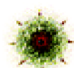
闵可夫斯基　摄影

闵可夫斯基的主要成就体现在其对数论、代数和数学物理的研究上。1881年，他深入钻研了高斯和爱因斯坦等人的论著，并建立了完整的理论体系。

1.17　闵可夫斯基四维空间

一个不是数学家的人会因听说“四维”事物而产生一种想到某种不可思议的神秘事物的惊异感。可是我们所共同居住的世界是一个四维“空间－时间连续区”却是再真实不过的事实。

空间是一个三维连续区，其意思是说，对于一个（静止的）点的位置，可以用三个数（坐标）x、y、z 来描述，并且在该点的毗邻处可以有无限多个模糊且不确定的点，它们的位置可以用 x'、y'、z' 来描述，这些





玻耳兹曼　摄影

玻耳兹曼是奥地利著名的物理学家，他创立的气体动力学促进了物理学的发展。

附：

四维空间

也称“四度空间”、“四度时空”、“四维宇宙”、“时空连续区”等。由通常的三维空间和时间组成的总体。这一概念由德国数学家闵可夫斯基提出，因此又称“闵可夫斯基时空”。要确定任何物理事件，必须同时使用空间的三个坐标和时间的一个坐标，这四个坐标组成的“超空间”就是“四维空间”。

狭义相对论小结

（1）　狭义相对论的思想可以概括为两个基本原理——相对性原理和光速不变原理。

相对性原理：所有惯性参考系都是等价的，或者说，物理规律对于所有惯性系都可以表示为相同的形式。

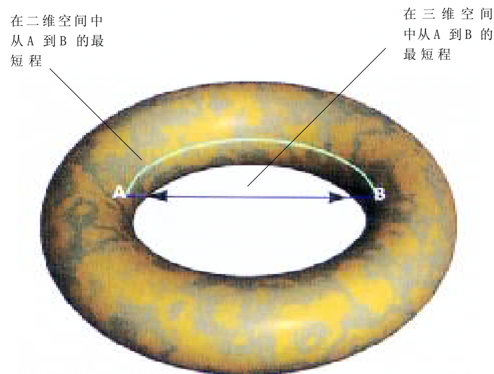
光速不变原理：真空中光速相对于任何惯性系沿任意方向恒为 c。

（2）　狭义相对论的理论核心用“洛伦兹变换公式”描述和换算。

（3）　狭义相对论有三个效应：运动尺度缩短、运动时钟延缓和同时的相对性。

坐标的值与第一个点的坐标 x、y、z 的相应值非常接近。由于值接近的性质，我们说这整个区域是“连续区”。由于有三个坐标，我们说它是“三维”的。

同样，闵可夫斯基简称为“世界”的空-时观世界的这一物理现象自然是四维的。各个事件组成了物理现象的世界，而每一事件又由三个空间坐标 x、y、z 和一个时间坐标——时间定值 t 来描述。这个“世界”也是一个连续区，因为对于每一事件来说，其



二维到三维空间　合成图片

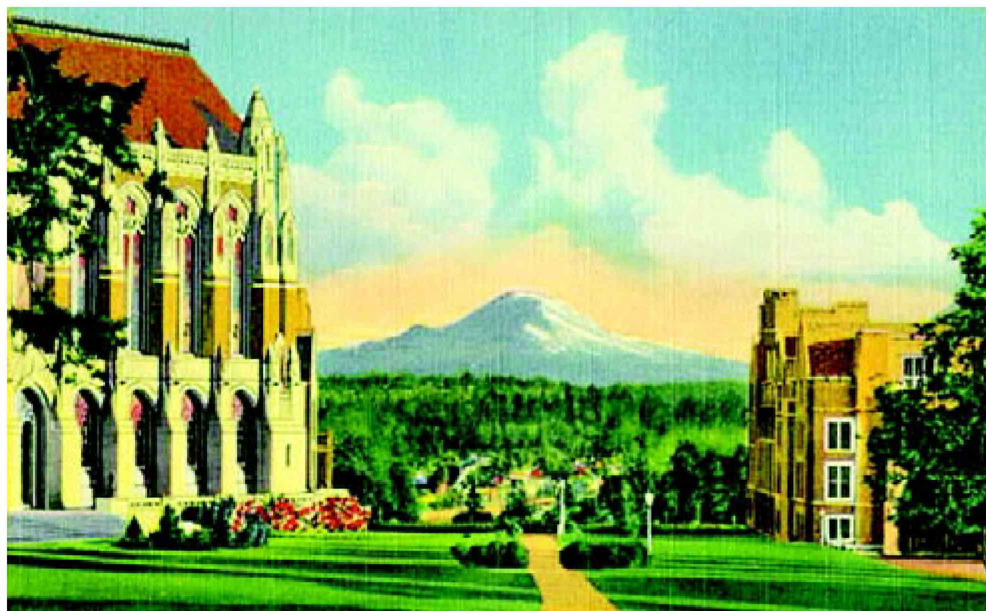
假设我们生活的空间只有二维，并且弯曲成像一个锚圈或环的表面。如果人是处在圈的内侧的一边而要去另一边，必须沿着圈的内侧走一圈。然而，如果允许在第三维空间里旅行，则可以直接穿过去。

（4）狭义相对论还有一些其他的结论：运动质量变大，速度相加定理，质能转换关系，能量—动能关系，作用的讯号与最大传播速度因果律等。

（5）狭义相对论适用于讨论高速（可与光速相比的速度）运动的物体，在低速情况下就将回到牛顿的经典力学。前面说的那个问题，错误就在

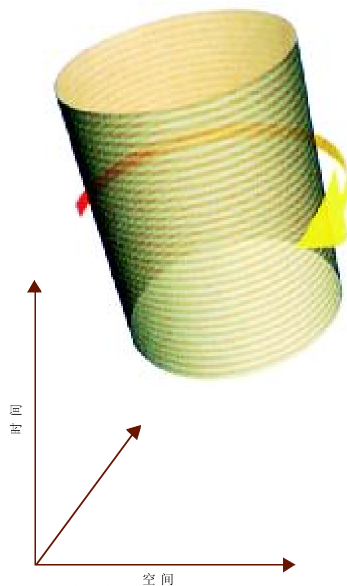
华盛顿大学　摄影

圣·路易斯的华盛顿大学坐落在美国密苏里州的圣·路易斯城郊，是当今全美最好的25所研究性综合大学之一。



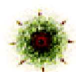
毗邻”的事件（感觉或设想到的）我们可以随意选取。这些坐标 x'、y'、z'、t' 与最初坐标 x、y、z、t 之间存在差值，按经典力学的观点来看，说明时间是绝对的，也就是时间与坐标系的位置和运动状态无关。我们知道，伽利略变换的最后一个方程（$t'=t$）已经把这点表示出来了。

在相对论中，用四维方式来考察这个“世界”是很自然的，因为按照相对论的观点，已经失去了独立性。这由洛伦兹变换的第四



因斯坦的宇宙　合成图片

爱因斯坦的宇宙像是一个圆柱面：它在空间中有限，而在时间中不变化。其有限的尺度，它可以在任何地方速度都比光速更低的情形下旋转。



于用经典的伽利略变换讨论了高速问题，因而导出了“不同坐标系中有不同物理规律”的谬误。

狭义相对论经受了多方面的实验证实，已成为现代物理学的主要理论基础。它对经典物理和量子理论的进一步发展具有极其重要的作用，尤其是对基本粒子理论的探索和对宇宙奥秘的研究更是不可缺少。

爱因斯坦的1905

“这一时刻对世世代代做出不可改变的决定，它决定着一个人的生死、一个民族的存亡甚至整个人类的命运。”在一本广为流传的小册子

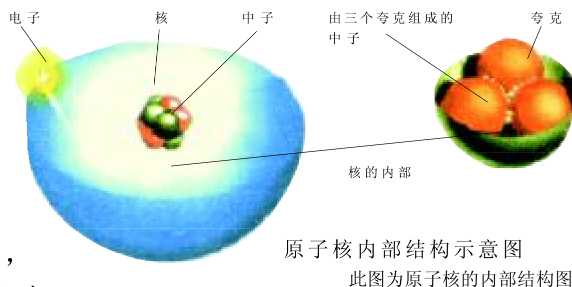


原子能爆炸　合成图片

原子的核裂变时所产生的能量远远比常规炸药猛烈得多。这幅图就描绘了原子能爆炸的情形。

方程表明：

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

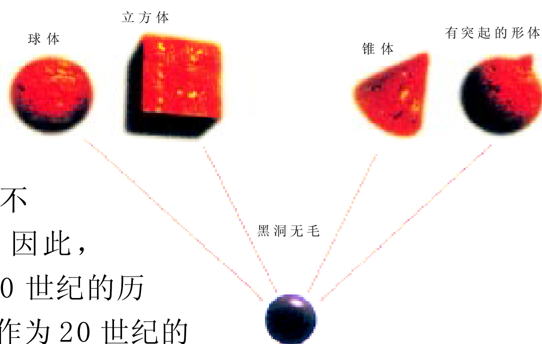


原子核内部结构示意图

此图为原子核的内部结构图。

此外，按照这个方程，在两事件相对于 K 的时间差为 t'，当 t' 等于零时，那么两事件相对于 K' 的时间差则不等于零。纯粹的两事件相对于 K 的“空间距离”成为该两事件相对于 K' 的“时间距离”。闵可夫斯基的发现对于相对论的公式具有重要的推导作用。另外，闵可夫斯基认识到，相对论的四维空间—时间连续区的性质在最主要的方面与欧几里得几何空间的三维连续区有明显的关系。为了使这个关系表现出来，我们引用一个与通常时间坐标成正比的数量来替换时间坐标。于是，满足（狭义）相对论要求的自

《人类群星闪耀的时刻》中，斯蒂芬·茨威格这样写道。在他看来，历史是由一个个伟大人物和一刻刻令人激动的瞬间组成，而其他的时间，只不过是历史的漫长的准备时期。因此，如果由斯蒂芬·茨威格来书写20世纪的历史，他毫无疑问会选择1905年作为20世纪的起点，人类群星中最闪亮的一颗在这一年放射光芒。

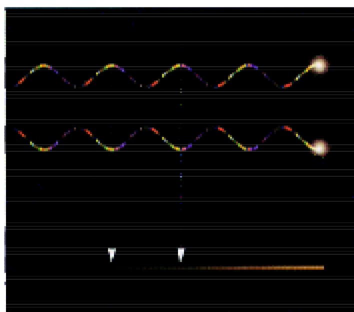
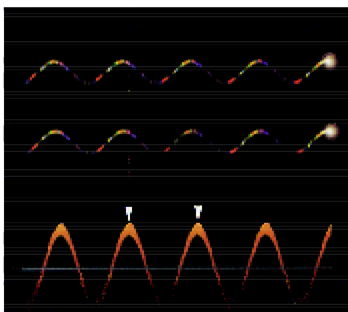


黑洞的终态　　合成图片

黑洞的终态依赖于它的质量转动速度。关于坍缩物体的大量信息丢失了。

1905年，爱因斯坦26岁。如果我们不知道他的名字是爱因斯坦，所有人都有理由相信这个不幸的年轻人这一年在人生这个大问题上是个失败者：中学辍学；非常艰难地在第二次投考中考取了苏黎世联邦技术大学；即使数学和物理很优秀，综合成绩中等的爱因斯坦也没有能够获得留校任教的机会；向苏黎世联邦技术大学提交的论文被教授拒绝。由于父亲的企业破产，爱因斯坦必须面临生计问题。他从事过中学教师和私人数学、物理辅导教师等职业。朋友格罗斯曼帮助他获得了在伯尔尼专利局的一份稳定工作，过上了小职员生活。他拥有一个妻子和两个孩子。

伯尔尼专利局局长弗里德里希·哈勒——一个物理学爱好者——成为爱因斯坦的第一个欣赏者。他给了这个急需稳定工作的年轻人一份公

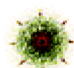



然界定律取时间坐标与三个空间坐标的作用完全一样的数学形式。在形式上，这四个坐标完全相当于欧几里得几何学中的三个空间坐标。即使不是数学家也会清楚地看到，正是由于这一纯粹形式上的知识的补充，使相对论能为人们所理解的程度增进不少。

通过以上并不充分的叙述，读者们能够对闵可夫斯基的重要贡献有一个模糊的概念。没

波长图　合成图片

光波长测量是伴随着光纤通信发展起来的一个技术领域，它与光纤通信的发展水平是密不可分的。光波长测量技术的高低是决定光通信发展状况的重要因素之一。因此，对光波长测量技术的研究具有重大的实用价值和理论意义。





查德威克　摄影

查德威克是英国实验物理学家。1891年10月20日生于曼彻斯特大学理学院，1911年毕业时成绩优异，随即留校在卢瑟夫指导下进行放射性研究并得硕士学位。1913年到德国柏林在盖革指引下继续研究放射性。第一次世界大战开始后作为“敌侨”被关入德国战俘营，在这里他仍在继续搞“在光照射下光气的生成”等物理实验。1919年，入英国剑桥大学从事α粒子人工轰击各种元素的试验。1923年被任命为剑桥大学卡文迪什实验室主任助理。1935～1948年任利物浦大学教授。1939～1943年参加英国及美国“曼哈顿工程”的原子弹研究，获得多种荣誉。1935年获诺贝尔物理学奖。

务员职务、一份还算丰厚的薪水。在伯尔尼专利局长达七年的工作时间，是爱因斯坦学术生涯中思维最活跃、精力最集中的一段时期。

七年之中的1905年，是爱因斯坦的“奇迹年”，同时也是物理学史上的第二个奇迹之年，只有牛顿思索微积分、万有引力定律和颜色理论的1655年可以与之相提并论。这一年爱因斯坦在德国著名物理学期刊《物理学纪事》上发表了一系列论文：论测定分子大小和布朗运动的《分子大小的新测定》、《热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动》，阐述狭义相对论的《论动体的电动力学》、《物体的惯性是否决定其内能》，以及关于光量子假说的《关于光的产生和转化的一个试探性观点》。1921年，爱因斯坦因最后一篇论文获得了诺贝尔物理学奖；而在百余年后的今天，出现在《物体的惯性是否决定其内能》中那个为世人所熟知的质量能量相互转换的公式$E=mc^2$，仍然是当之无愧的最著名的科学符号。

有闵可夫斯基的贡献，广义相对论的基本观念或许将永远停留在襁褓之中。不熟悉数学的人对闵可夫斯基的学说无疑难于接受，但要理解狭义或广义相对论的基本观念并不需要对闵可夫斯基的学说有精深的理解，目前我先谈到这里，本书第二部分结束时我将再回过头来谈谈它。

对闵可夫斯基四维空间（“世界”）的补充

我们能更简单地将洛伦兹变换的特性表述出来，即引用假定的$\sqrt{-1}\cdot ct$代替 t 作为时间变量。与此一致，如果我们引入

$$x_1 = x$$
$$x_2 = y$$
$$x_3 = z$$
$$x_4 = \sqrt{-1}\cdot ct$$

“对不起，牛顿。”爱因斯坦不无幽默地说。同时，他又自我解嘲：“我一生反对权威，上帝为了惩罚我，把我自己也变成了权威。”

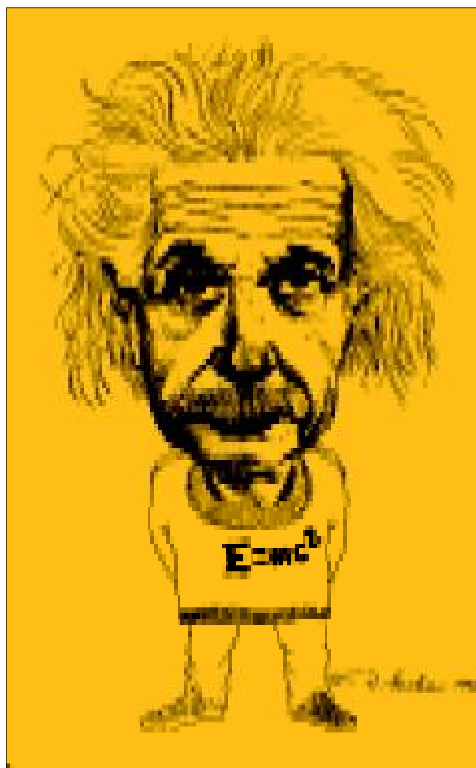
1919 年，世界上“能够理解相对论的两个半人”之一的爱丁顿通过对日全食时光线弯曲的测量，证实了爱因斯坦的预测。这让爱因斯坦成为风靡全球的学术明星和物理学权威。有一个传言：爱因斯坦警告自己著作的出版商，世界上可能只有12 个人能够明白相对论，但是世界上却有了几十亿人借此明白没有什么是绝对的。

爱因斯坦一生都不理解也不赞成将相对论应用于物理学之外，但是，以1905 年为原点，他的相对论思想却在不断被引向文学、艺术、哲学、宗教等几乎所有包含着人类思维的学科。

哈佛大学　摄影

哈佛大学成立于1636 年，其文理研究生院于1872 年组建，是全美最古老的大学之一，迄今已培养出6 位美国总统、29 位诺贝尔奖得主和27 名普利策奖得主。哈佛大学不但是美国政府制定国内外政治、军事、外交政策的思想库，而且在校内，各种学术流派和政治主张都十分活跃。





爱因斯坦　漫画

爱因斯坦（1879~1955），是举世闻名的德裔美籍科学家，现代物理学的开创者和奠基人。

对带着重号的坐标系 K' 也采取类似的方式，那么为使洛伦兹变换公式相等，我们的必要条件应该表示为：

$$x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2+x_4'^2=x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2$$

（12）

也就是通过上述"坐标"的选用，公式（11b）变换为公式（12）。

我们看到在公式（12）中，虚构的时间坐标 x_4 以完全相同的方式进入空间坐标 x_1、x_2、x_3 这个变换条件中。正是由于如此，依照相对论，"时间" x_4 应与空间坐标 x_1、x_2、x_3 以同等形式进入自然定律中去。

闵可夫斯基称之为"世界"的四维连续区，是用"坐标" x_1、x_2、x_3、x_4 来描述的，他把代表某一事件的点称为"世界点"。这样，按照物理学说法，三维空间中的"事件"就成为四维"世界"的"存在"。

这个四维"世界"　近似于（欧几里得）解析几何学的三维"空间"。如果我们引入一个具有同一原点的新的笛卡儿坐标系（x_1'，x_2'，x_3'）于"空间"之中，那么 x_1'、x_2'、x_3' 就是 x_1、x_2、x_3 的线性齐次函数，并且等于方程

$$x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2=x_1^2+x_2^2+x_3^2$$

这个完善的方程与（12）类似。我们在形式上可以把闵可夫斯基"世界"看作（假想时间坐标）四维欧几里得空间、四维"世界"与洛伦兹变换的坐标系的"转动"相一致。





第二章

广义相对论



存在与时间　摄影

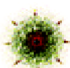
在经典物理学中，时间是一维的向度，而在爱因斯坦的相对论中，时间则有了二维的向度。

2.1 狭义和广义相对性原理

狭义相对性原理是我们论述的中心，作为一切匀速运动具有物理相对性的原理，让我们对它的意义再一次进行小心谨慎的分析。

有一点一直很清楚，从狭义相对性原理的观念来看，任何运动只能被认为是相对运动。回过头来看看路基和车厢的例子，用下列两种同样合理的方式可以表述所发生的运动：

（a）相对于路基而言，车厢是运动的。



附：

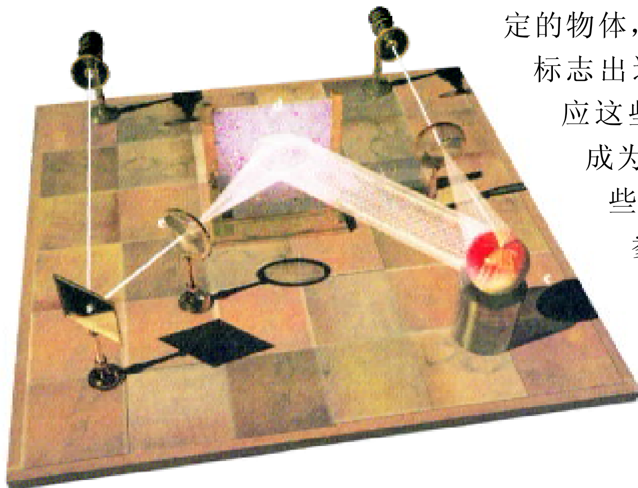
相对性原理

相对性原理是力学的基本原理。

从一开始，人们对自然的研究和对自然力量的利用，与使物体个体化相联系。一个物体到另一物体的距离随时间发生变化。当它们依然是所论物体的不可分割的背景的时候，我们就无法用数列对应于该物体的位置和位置的改变，也就不能对物体的位置和速度实行参数化。对于一个给定的物体，它相对于一些物体运动，标志出这些物体，然后用数列对应这些距离，于是这些物体就成为参照物，而给定物体到这些物体的距离的全体就成为参照空间。对应于距离的所有的数就组成为一个有序系统。于是，也就引进了同参照物联系在一起的坐标系。在此，

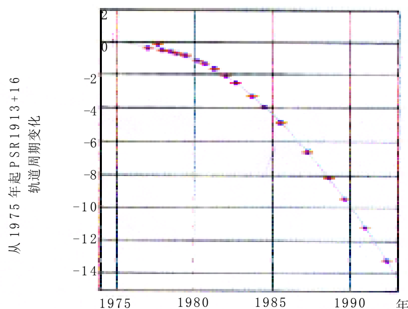
扩束镜　合成图片

扩束镜通常包括一个输入的凹透镜和一个输出的凸透镜。输入镜将一个虚焦光束传送给输出镜。这就是扩束镜的工作原理。



双脉冲星PSR1913+16示意图

1975年罗素·荷尔西和约瑟夫·泰勒发现了双脉冲星PSR1913+16，这是由两个紧致中子星组成的系统。这幅图就描绘了从1975年起双脉冲星PSR1913+16的运行变化图。



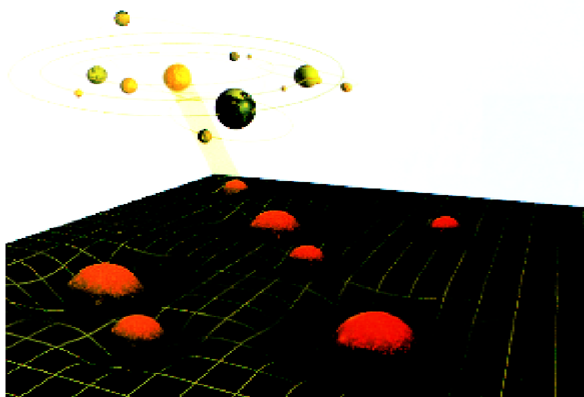
从1975年起双脉冲星PSR1913+16的图

（b）相对于车厢而言，路基是运动的。

在（a）中把路基当做参考物体，在（b）中把车厢当做参考物体，这是我们对发生的运动的陈述。如果仅仅只基于探侧或者描述运动，那么具体考察物体运动的参考物是什么在原则上并不是很重要。这一自明之理我们在前面已经提到，不过这一点并非我们的研究基础，也不能与更为广泛的“相对性原理”的陈述相混淆。

作为一种既可以让我们选择车厢也可以让我们选择路基来作为参考物

所谓相对性原理，就是坐标系的平等性，从一个坐标系转换到另一个坐标系的可能性，以及给出坐标变换时刚体内部的特性与其各质点的距离及其结构的不变性。

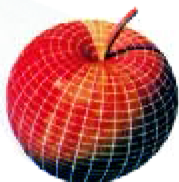


物体的运动　合成图片

广义相对论将引力描述成因为时空中的质量和能量而引起的时空弯曲。物体试图以直线方式运动，但是它们的路径因为时空的弯曲而被弯折。

力学的全部发展过程，一直同参照系统变更时扩大物理客体不变性概念的范围联系在一起。在17世纪，人们已经判明物体的结构与坐标系的选择无关，同时也明确了从一个坐标系过渡到另一个相对它做匀速直线运动的坐标系时，力和加速度之间关系的不变性。伽利略伟大发现的内容，如果用现代物理语言陈述，即是如此。它是近代自然科学的真正起点。

牛顿根据运动三定律得到的结论陈述了相对性原理。但是，牛顿力学不能没有绝对运动的概念。绝对运动概念联系着力和加速度。力的作用不是单值的。比如，在一个计算系统中，力引起某个加速度，那么在另一个相对于前者是以加速运动的系统中，它却可以引起另一种加速度（不排除加速度为零的情况）。因此，只有根据引起绝对加速度的系统中

三维空间　合成图片

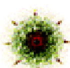
在经典物理学中，时间和空间的区别在于空间具有三维性，而时间只是一维。爱因斯坦的相对论原理彻底颠覆了这种理论。

体描述任何事件的原理，我们的定律断言：如果我们用简洁的陈述来表达普遍的自然界定律时为

（a）　路基作为参考物体；

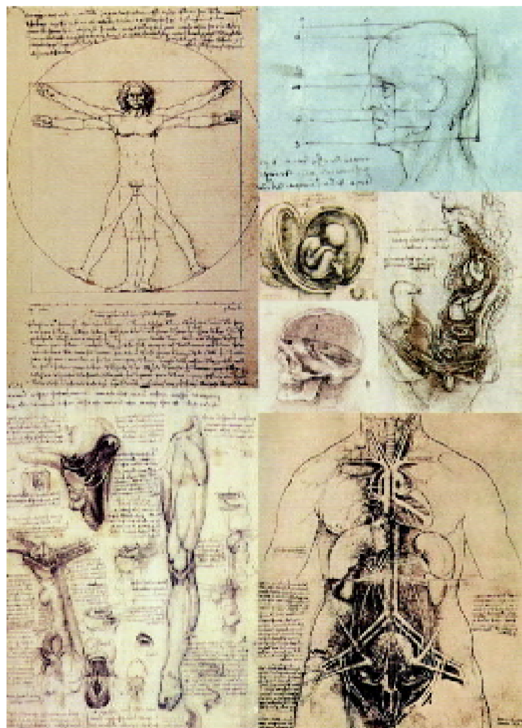
（b）　客车作为参考物体。

这些普遍的自然界定律（例如力学或真空中光的传播定律）在上述两种情况中的形式完全一样。这一点也可以用简洁的陈述表达如下：用物理方法描述自然过程时，在参考物体 K、K' 中没有一个与另一个相比是独特的（特别规划）。这与第一个陈述不同，后一陈述并不一定根据推论成立，“运动”和“参考物体”的概念并不包含、推导出这一陈述，唯有



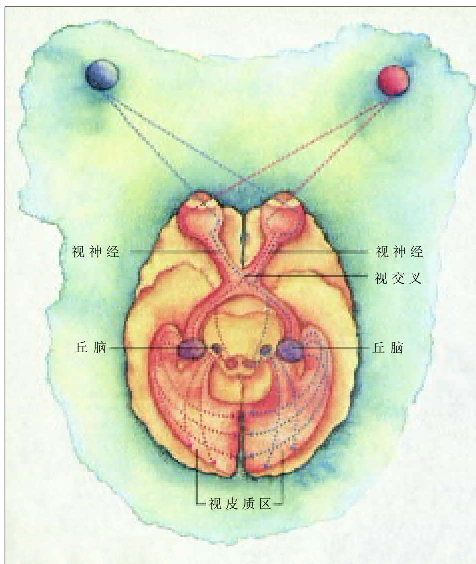
的力，才能把绝对运动加以标志。牛顿做了一个把水盛在旋转着的桶中的著名实验，用以作为证明存在着绝对运动和绝对空间的判定。对牛顿来说，离心力的存在是绝对运动的决定性的论据。

牛顿认为，绝对运动并不是相对于一些个别的物体，而是相对于空间。这种绝对静止的空的空间可以看成充满整个宇宙的、数目不定的、离散存在的物质和“宇宙气”的总代表。所谓物体相对于空间运动，本身就意味着把一个被个体化的物体同一个不可分割的背景加以对照。他认为，加速度就是相对这一没有被明确的背景而言的。然而在每一个具体的动力学的课题中他必须应用和具体的物体联系在一起的某个计算系统。因而在给出动力学课题的范围后必须把相对静止的物体和与具体物体无关的，作为绝对空



人体解剖　达·芬奇　素描

人们对于物理学的认识，正如人们对自身的认识，是随着历史的发展日益得到进步的。



脑电图　合成图片

脑电图是用脑电图仪在着皮表面引导记录到的脑部生物电活动的波形图。如果直接在大脑皮层表面记录的皮层自发电位活动，称为皮层脑电图。脑电图的波形很不规则，其频率变化范围每秒约为1～30次，通常将此频率变化分为四个波段：δ波——频率为0.5～3次/秒，波幅为20～200微伏，正常成人只有在深睡时才可记录到这种波。θ波——频率为4～7次/秒，波幅为100～150微伏，成人在困倦时常可记录到此波。（θ和δ波统称慢波，清醒的正常人身上一般记录不到δ波和θ波）；α波——频率为8～13次，波幅为20～100微伏，α波是正常成人脑电波的基本节律，在清醒并闭眼时出现。β波——频率为每秒14～30次，波幅为5～20微伏，安静闭目时只在额区出现，睁眼或进行思考时出现的范围较广，β波的出现一般表示大脑皮层处于兴奋状态。正常儿童的脑电图与成人不同，新生儿以低幅慢波为主，随着年龄增大，脑电波频率逐渐增加。



间出现的，被赋予特权的计算系统加以区分。

在自由度数很大甚至无限大的系统中，相对运动会受到限制。但只要我们回到那种不可分割的、整体连续的事件中，只要我们放弃单个物体位置和运动的参数变化以及某些所必备的坐标系，那么绝对运动和相对运动的对立就不存在了。对某一质点的热运动来说，相对性的概念就没有什么作用了。要是可以把宇宙气体同连续介质组成一体的话，牛顿的绝对空间就会获得唯理论的意义。

在物理学中，力学的终极概念得到了因果解释。对物理学而言，力的概念是个必须加以分析的概念。物理学确定了力的数值，在个别情况下，当质点无摩擦地运动时，力可以是坐标的函数。这种函数的形式应由引力论、弹性理论、电动力学理论中对引力、弹性力、电力、磁力的研究给出，并且这种研究与力学不同，完全按另一种方式进行，这些力已不再是终极概念。恰恰相反，现代科学的任务，正是要用物理的或数学的方法把它们从另外的量中推演出来。

旋转椅　摄影

当物体快速旋转时，就会产生离心力。它是一种将所有东西推出旋转圆圈之外的力量。事实上，它也是向心力的反作用力，而向心力就是一种向圆心靠拢的力量。例如，当我们乘坐游乐场中高空旋转椅所感受到的强大飞离感，部分是由中心快速旋转后造成的推动力所带来的，这就是离心力。





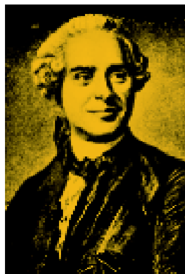
依靠经验才能确定这个陈述是否正确。

迄今为止，我们不认为所有参考物体 K 能够用简洁的陈述表达自然界定律。我们的思路首先源于一个假定：一个存在的参考物体 K，它所具有的运动状态相对于伽利略定律而言是成立的。一质点若离其他质点足够远时，该质点沿直线做匀速运动。关于 K（伽利略参考物体）表述的自然界定律存在最简单之处。但除 K 外，参照 K_1 表述的自然界定律也应该是最简单的。倘若这些参考物体相对于



仿生　素描

仿生学是发展相当迅速的一门新兴科学。仿生学主要是利用自然界动物的特性和习性来研究其特性应用的一门科学。在人类历史上的一些创造和发明有很大部分是从自然中得到启发的。



达朗贝尔　油画

达朗贝尔（1717~1783年）是法国著名的物理学家、数学家和天文学家，一生研究了大量课题，完成了涉及多个科学领域的论文和专著，其中最著名的有8卷巨著《数学手册》、力学专著《动力学》、23卷的《文集》、《百科全书》的序言等等。

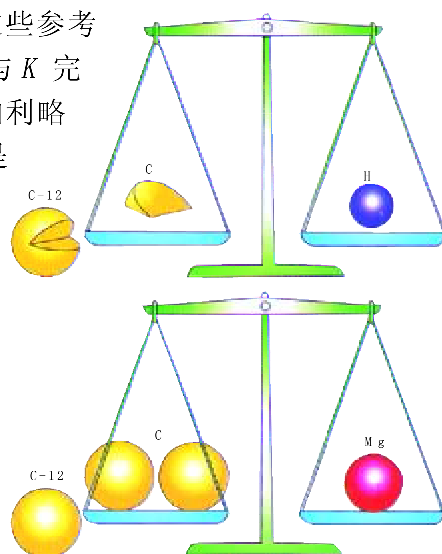
达朗贝尔在《动力学》一书中指出，作用在质点上的力可以被两个分力所替代，其中一个分力指向与约束一致的运动的路线。倘若质点是自由的，它将要沿着由两个分力构成的平行四边形对角线的方向运动。而实际上，质点似乎只在一个分力的作用下运动，另一个力好像是不存在。达朗贝尔就把它称之为遗失的力。被遗失的力没有引起质点的加速度，就在系统中无影无踪了，它已被约束反作用所抵消。可以指出：所谓遗失的力，就是作用在质点上的力和惯性力的合力。作用在质点上的外力和被约束条件所决定的反作用力、惯性力处于平衡之中。也就是说，遗失的力被约束反作用力所平衡。

达朗贝尔所引入的惯性力曾被叫做虚构的力。在此之后，动力学问题被归结为静力学问题。每一个运动方程都与平衡方程相对应，这个平衡方程以具有所谓虚构的惯性力而区别于运动方程。

实在的力和虚构的力之间是相对的。如果把达朗贝尔所引入的力认为是施于所论物之上的力，则该力就是虚构的；如果把此力认为是施于别物之上的力，则达朗贝尔引入的力就是实在的。如果把坐标原点从一个物体移到另一个物体上面，那么虚构的力就将是实在的，而实在的力

K 处于匀速直线非旋转运动状态，则这些参考物体对于表述自然界定律的等效性就与 K 完全一样。所有的参考物体都应认为是伽利略参考物体，我们的假定相对性原理只是对于上述参考物体才有效，对于其他的（例如具有不同性质状态的参考物体）则是无效的。因此我们说这是特殊相对性原理或狭义相对论。

与之形成对照的是，我们对“广义相对性原理”的理解概括为下列陈



原子量　合成图片

以碳原子质量的1/12为标准，其他原子的质量跟它相比较所得的一种相对质量，简称原子量。它只是提供一种标准，如同天平的砝码。

则将是虚构的。

每一系统都是用属于该系统的全体质点在此时的位形加以表征，这样的位形可以看成是多维空间的一个点。拉格朗日在《分析力学》中给出了系统状态及其运动的坐标表象之普适方法，即广义坐标法。它把空间中质点的位置，即古典力学的原始的形象和被当成是多维“空间”的点的系统的位形相对应。从几何的观点来说，这是在拉格朗日把四维时空引入科学之后所采取的下一个步骤。当拉格朗日在《分析力学》中用四维解析几何的形式阐明古典力学原理之后，当达朗贝尔在《百科全书》的量度一文中把时间看成是第四维的时候，他就已经把第四维的概念引入科学。由于柯西、凯尔、普留凯尔、黎曼、格拉斯曼的努力，多维空间的理论

贝尔实验室　佚名　素描

1925年1月1日，AT & T与西方电器公司的工程研究开发部合并，成立了贝尔实验室。今天，它是朗讯科技公司的研究开发部门。贝尔实验室承担的任务是提供技术以创建世界上最先进的电信系统。



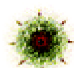
述：所有参考物体K、K_1等，不管其运动状态怎样，但对自然现象（表述普通的自然界定律）的描述都是等效的。在我们继续往下深入讨论前应该指出，这一陈述必须要代之以一个更为抽象的表达方式，当然，具体的缘由要到以后才会明白。

狭义相对性原理已经被证明是



宇宙航行　合成图片

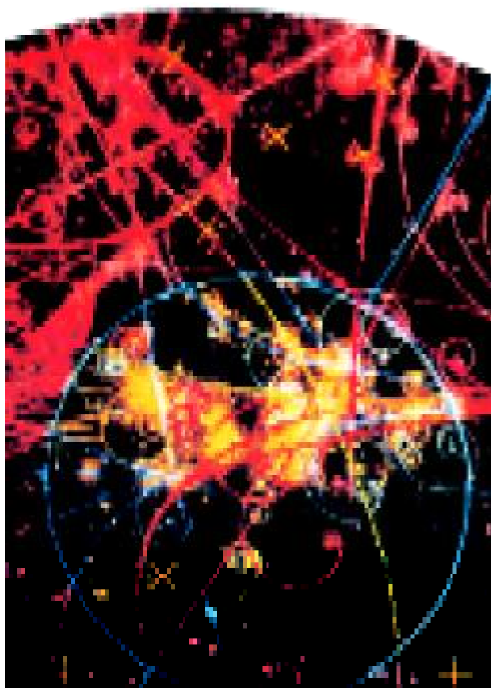
广义相对论的提出，使空间和时间的旅行成为理论上的可能，更在一定的程度上拓展了人们在传统物理学意义上对时空的视野。



在形式化方面得到了很大发展。这一发展，为相对论、量子力学准备了富有成效的多维几何学的解释。

在拉格朗日看来，广义坐标不仅可以是质点系的笛卡儿坐标，而且也可以是描绘该系统位形的任何一种参数。对一个受到引力或弹性力作用的质点系统来说，每一时刻作用在系统中各点上的力（也就是加速度）由广义坐标所决定。物体的速度不影响加速度，当已知系统位形时，速度有可能取不同的值。如果是这样，那么，即使已知加速度，下一时刻系统的位形也是不确定的。所以，如果要确定系统在未来每一时刻的状态，不仅必须给出已知时刻的坐标，而且还要给出速度。

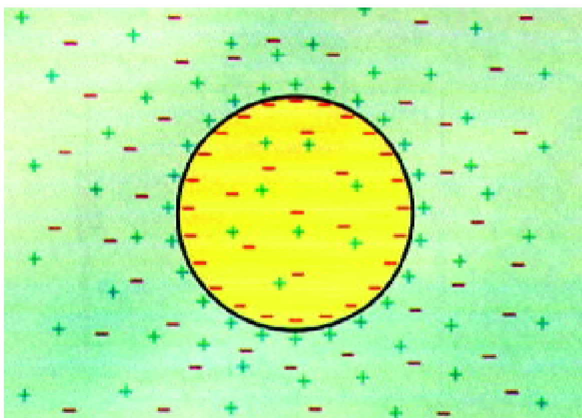
当我们从原始的、直接给出



量子力学及薛定谔方程　摄影

量子力学的“测不准原理”是从科学角度对一元论的一次打击。图为实验箱内，各种微粒从加速器中射出后所呈现出的飞行轨迹。所谓薛定谔方程，是当知道某一时刻的波函数，便能用该方程去计算过去或未来的波函数，但它的位置和速度都永远反抗统一。

合理的，而每一个想证明普遍化结果而努力的人必然向广义相对性原理的方向探索前进。从一种简单且显然的考虑来看，这样一种企图就目前而论成功极为渺茫。我们还是将思绪转回匀速前行的火车车厢，在作匀速运动的车厢中，乘客是不会感到车厢的运动的。因为这个理由，他可以欣然地做出“该例子表明车厢是静止的，而路基是运动”的解释。



粒子电荷　示意图

每种粒子都具有确定的电荷。实验表明，已发现的各种粒子的电荷都是质子电荷 e 的整数倍，这个规律称为电荷量子化。对电荷量子化的最精确实验检验是测量质子与电子电荷的代数和，如果电荷量子化严格成立，则其值应严格为零。

的、不可分割的混乱的图景中区分出个别的物体和运动的时候，我们是把在空间中改变自己位置的物体的一系列自身同一的状态认为是某种过程，这是力学最原始的表象。力学之原始形象，就是坐标随时间改变的自身同一的物体。我们完全可以“识别出”在每一个相继时刻的物体。它的基本前提是以坐标的连续变化加以保证的。如果我们把物体在一个位置和另一位置的间隔上的每一个点都记录下来，那么就可以断言出现在我们面前的是同一个物体。物理客体这种个体性，让我们知道物体在某一时刻的状态的情形下，就可以预见每一个相继时刻的状态。因此，所谓状态，即是标志若干物理量的综合，而这种综合以单值的形式同每一个相继时刻的、每一个相似的综合联系在一起。根据这种状态的连续性和单值的依存关系就可推出运动的微分方程。当已知初始条件时，借助此方程就能绝对准确



笛卡儿　素描

笛卡儿不仅在哲学领域里开辟了一条新道路，而且在数学上也有非凡的成就，推动了数学发展的进程。当时，代数还是一门比较新的科学，几何学的思维还在数学家的头脑中占有统治地位。1637 年，笛卡儿发表了《几何学》，创立了直角坐标系。他用平面上的一点到两条固定直线的距离来确定点的距离，用坐标来描述空间上的点。

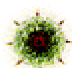


而且按照狭义相对性原理，从物理观点来看，这种解释也是十分合理的。

如果车厢的运动现在变为非等速运动，例如猛然拉动刹车，那么车厢里的人就有一种身体倾向前方的猛烈运动，这种减速运动是物体相对于车厢里的人表现出来的一种力学运动，它

无穷　合成图片

科学史上的诸多事实都显示了无穷概念的巨大重要性和深远影响。正如数学史家M.克莱因所说："数学史上最使人惊奇的事实之一是实数系的逻辑基础竟迟至19世纪后叶才建立起来。"而这明显是由于人们在理解无穷这个概念上所遇到的巨大困难造成的。另一方面，我们认为这些困难也正阻碍人们对20世纪20年代所发现的最惊心动魄的微观物质理论——量子力学的深刻本质的认识。



地预知物体以后的全部运动。

物理学的影响使力学的基本原理——相对性原理，改变了形式。在牛顿运动方程里，作为纯力学量出现的是质点的空间坐标。质点相对于某个坐标系运动，并且在坐标变换时，即从一个惯性系过渡到另一个惯性系时，运动方程是协变的。具有广义坐标的拉格朗日方程，可以描述其他非力学的过程，当坐标变换时，它是否还保持协变性呢？爱因斯坦的相对论指出：如果所论系统是匀速直线运动，则方程是协变的。这样一来，相对性原理就推广到非力学的过程，并且使古典物理获得了最终的形式。为此，古典物理学须放弃不变的空间距离和时间间隔，而代之以不变的四维间隔。此时，相对性原理仍旧是统一宏观物理学和力学的普遍原理。因此，可以说，相对论是世界之古典图景的总结。

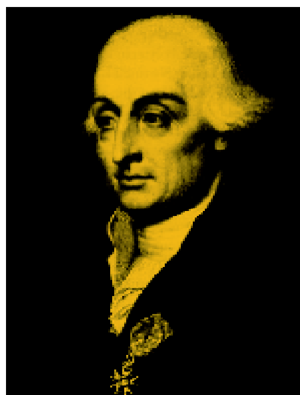
百科全书　书影

百科全书传承了许多进步的思想，为西方资产阶级自由理论的产生提供了理论上的支持。



我们把全部历史的变更都归拢在一起来讨论相对性原理，或者说讨论适用于伽利略、牛顿的古典原理和爱因斯坦的狭义、广义相对论的普遍的相对性概念。伽利略、牛顿原理适应于缓慢的

与以前我们考虑的力学运动并不相同。因此，即使是对于静止或作匀速运动的车厢能成立的力学定律，也不可能对于作非匀速运动的车厢同样成立。无论如何，伽利略定律对于作非匀速运动的车厢显然是不成立的。因为这一原因，我们目前不得不暂时采用与广义相对性原理相反的做法，将一种绝对的物理实在性赋予非匀速运动，但不久后我们就会看到，这个结论显然不能成立。



拉格朗日　油画

拉格朗日科学研究所涉及的领域极其广泛。他在数学上最突出的贡献是使数学分析与几何和力学脱离开来，使数学的独立性更为清楚，从此数学不再仅仅是其他学科的工具。拉格朗日总结了18世纪的数学成果，同时又为19世纪的数学研究开辟了道路，堪称法国最杰出的数学大师。同时，他的关于月球运动（三体问题）、行星运动、轨道计算、两个不动中心问题、流体力学等方面的成果，在使天文学力学化、力学分析化上，也起到了历史性的作用，促进了力学和天体力学的进一步发展，成为这些领域的开创性或奠基性研究。

惯性运动，狭义相对论适用于可以和电磁振荡传播的速度相比拟的惯性运动，广义相对论适用于引力场中质点或质点系的加速运动。上述情况中，坐标以这样或那样的方式随时间而变化，指在每一时刻，定域于空间中的物理客体，在保持自身不变的同时从空间的一个点转移到另一个点。这个客体能够以任意速度（古典的相对性原理），或以被某个恒定的（狭义相对论），或以引力场所决定的（时空弯曲、广义相对论）速度通过这些处所。无论取哪一种观念，只要指明自身同一客体相对它做运动的那个物体，则自身同一客体运动的概念就是有意义的。至于这个论题（即能否提所谓位置、速度、加速度的相对性）能够用到哪种坐标变换上面，还应当由实验指出。把现已知晓的相对性理论都归拢起来，这才是相对性原理的意义所在。

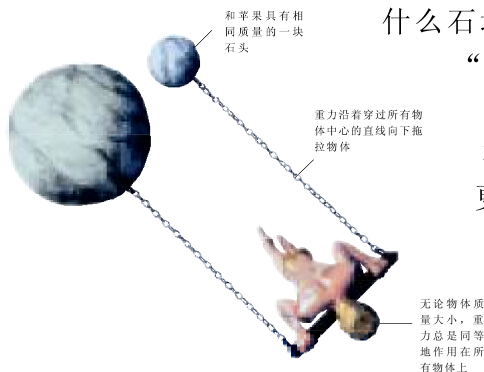


哥伦比亚大学　摄影

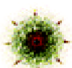
创立于1754年的纽约，是美国著名的私立大学。图为哥伦比亚大学美丽的风貌。

2.2 重力场

重力示意图



“如果我拾起一块石头，然后放开手，为什么石块会落地呢？”通常人们的回答是：“这是因为地球有吸引力的缘故。”但是，现代物理学对这个问题则有不一样的解答，其理由在于：对电磁现象更仔细地加以研究后，我们可以看到，如果没有某种中介媒质起作用，超距作用是不可能实现的。例如磁铁吸引一块铁，我们不能就磁



引力　漫画

牛顿创立的万有引力定律，从其面世以来，就引起了轰动。图为一组表现万有引力理论的漫画。



附：

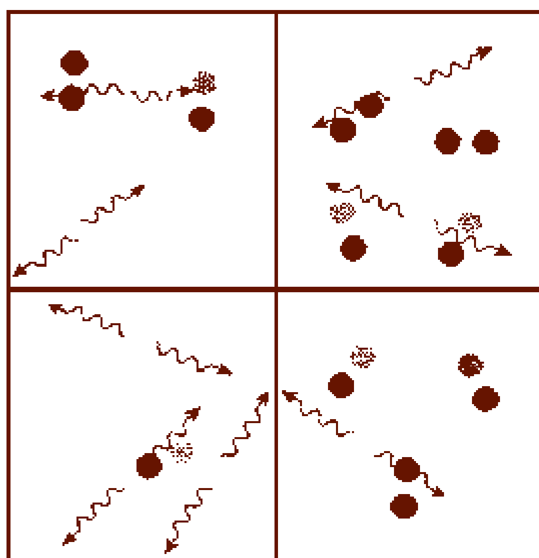
引力

引力，也称“万有引力”。是指两个物体之间由于物体具有质量而产生的相互吸引力。地面上物体所受的重力，就是地球与物体之间的这种吸引作用。地球、行星绕太阳运行，月球、人造卫星绕地球运行，都与它们之间的引力有关。牛顿在开普勒定律的基础上，首先肯定了这样一种吸引力的存在，并确定了质量不同的两质点间的力的大小公式，被称为“万有引力定律”。

引力场

引力场，也称“重力场”。指传递物体之间的万有引力作用的物理场。其特点是：在场的同一

铁直接穿过真空对铁块产生吸引力这一解释感到满意，因而我们只有按照法拉第的方法，假定磁铁总是在它附近的空间产生某种具有物理性质的东西，我们称为“磁场”。磁场作用于铁块，使铁块总是朝着磁铁移



量子力学　示意图

量子力学是描述微观世界结构、运动与变化规律的物理科学。它是20世纪人类文明发展的一个重大飞跃，量子力学的发现引发了一系列划时代的科学发现与技术发明，对人类社会的进步作出了重要贡献。著名科学家爱因斯坦经过认真思考，于1905年提出了光量子说。1916年美国物理学家密立根发表了光电效应实验结果，验证了爱因斯坦的光量子说。

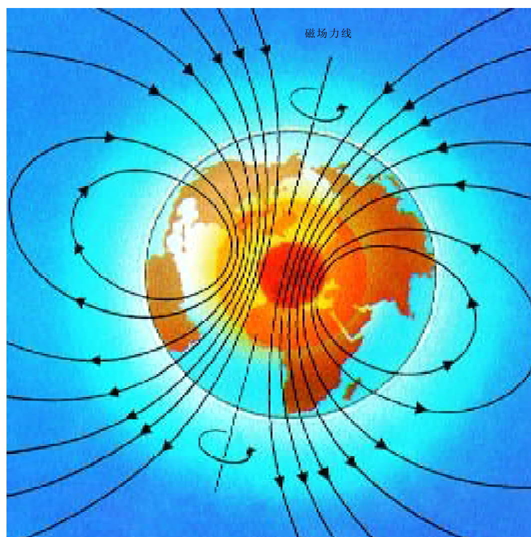
点上，任何质量的物体都得到相同的加速度。

牛顿引力与相对论不相容

在微观范围内，万有引力比电磁力弱得不可比拟，比如在氢原子中，质子与电子之间的电磁力，比它们之间的万有引力大1 039倍。但是，在宇宙天体范围内，在质量高度集中的情况下，万有引力无疑起着绝对的主导作用。计算表明，太阳对地球的万有引力，比拉断直径等于地球直径的钢索所需的力还要大。之所以在狭义相对论中要回避万有引力，是因为牛顿的万有引力定律与狭义相对论的框架不相符。

地球磁场　示意图

地球如同一块磁铁，地球磁场相当于一个偶极子发出的磁场。目前两个磁极的轴与地理两极的轴相比有11°的倾斜。古地磁学研究表明，偶极子在地质时期有时北南方向，有时南北方向。与地质时期相比，可恢复过去磁场方向逆向的磁场比例。



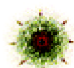
引力场和反引力场的种类

从第二级量子即“引力子”与“反引力子”层面看，宇宙万物都是引力子与反引力子在

动。严格地说，这是一个枝节性的概念，我们姑且不讨论这个有些任意的概念是否合理，只是稍稍提及一下，电磁现象的理论表述借助这个概念，要比不借助这个概念满意得多，对于电磁波的传播来说更是如此。我们可以用类似的方式来看待万有引力[1]。

地球对石块产生的作用是间接的。环绕地球周围产生了一个引力场，引力场对石块起作用，引起石块的下降运动。我们从经验中了解，当我

[1] 万有引力：物体间由于质量而引起的相互吸引力，这种力存在于地球万物之间。地面上物体所受到的地球对它的吸引力，就是万有引力。牛顿在开普勒定律和自由落体定律的基础上首先肯定了这样一种吸引力的存在，并确定了质量分别为 m_1 和 m_2，相距为 r 的两质点间，这力的大小为 $F=Gm_1m_2/r^2$ 。其中 G 称为“引力常数”，等于6.672 59 × 11^{-11} 米^3/（千克·秒^2）。 地面上两物体间的万有引力，一般很小，但对质量大的天体，这个力就很大，例如地球和太阳之间的吸引力大约为3.56 × 10^{22} 牛顿，这样大的力如果作用在直径9 000 千米的钢柱两端，可以把它拉断。万有引力定律的发现奠定了天体力学的基础，揭示了天体运行的基本规律，从而解释了极多的地面现象和天体现象，例如哈雷彗星、地球的扁形，预测了海王星、冥王星的位置等。它也是宇宙航行计算的基础。





沉重且相对的思考　宾斯顿　油画　1952 年

牛顿的万有引力定律解放了人又锁住了人。人们豁然开朗：人为什么不能向天上飞而只能困在大地上。牛顿力学基于静止单一时空的理论，却在20 世纪被爱因斯坦的 $E=mc^2$ 修改。

相互作用中形成的，形成宇宙的两类场，一是引力场，二是反引力场。

引力场和反引力场都是球形场。引力场是一种球形的漩涡场，产生向内的力；反引力场是一种球形辐射场，产生向外的力，如电磁波。引力场的基本形状是漩涡形。反引力场的基本形状是水波辐射形。引力场的漩涡形常见于漩涡星系、漩涡星云及各种混沌现象中；反引力场的水波辐射形则常见于有电磁力、强核力、弱核力参与的过程中，如电磁辐射。当然，在各种混沌现象中也比较常见。

们远离地球时，地球对物体的作用的强度以一个相当明确的定律减小，从我们的观点来观察意味着：支配空间引力场的性质的定律必须是一个完全确定的定律，它可以准确地表述引力作用是怎样因物体与受作用物体间的距离的增加而减小的。我们可以这样说：物体（例如地球）在其附近最接近处直接产生一个场，支配引力场本身



氢元素　合成图片

氢有三种同位素：1H（氕）、2H（氘，也叫重氢）、3H（氚，也叫超重氢），其中1H在自然界的丰度为99.985%。氢的单质在通常情况下为无色、无味的气体。氢气是最轻的气体，微溶于水。

宏观天体中，存在有集成引力场、黑洞引力场。微观物质中则有左引力场、右引力场、质子引力场、原子核引力场、化合引力场等。除黑洞引力场外，与上述引力场并存的还有各种反引力场。

黑洞引力场

天体引力场中的引力子运行路线呈螺旋形，这从银河系等稳定星系的俯视图中可清楚看出。银河系的四条悬臂呈向内旋转的螺旋形，这很明显是银河中心黑洞引力场中的引力子的运行路线，其中，各种可见物质都随着引力子的拉曳路线在运行。

从银河中心黑洞引力场看，天体引力场就像一个球形的漩涡，与天体自转轴垂直处一个圆盘形的场，此处引力子流密度最低，引力最弱，称为“吸积盘”。银河中心的吸积盘，形状如银盘，黑洞就在银盘中心的银核内。银盘外面是一个范围广大、呈球状分布的系统，叫做银晕，银晕外面还有银冕，也呈球形，直径比银晕大3～5倍。银冕代表黑洞球形引力场所能束缚的可



比萨斜塔试验　合成图片

伽利略在比萨斜塔做过一次著名的试验：利用不同重量的物体来测定物体下降速度。他的这次试验，改变了科学的历史。



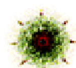
的空间性质的定律决定了场距离物体各点的强度和方向。

与电场和磁场形成对比，引力场有一种对下面的论述具有十分显著和重要意义的性质。运动的物体在一个引力场独一无二的影响下，得到了一个与物体材料和物理状态都毫不相干的加速度[2]。

牛顿　漫画

牛顿有时候也被人们称为“最后的炼金术士”，因为除了在物理学方面的建树外，他也在炼金术领域做过实验。对于大多数同时代的人来说，他的物理学理论和“炼铅为金”的思想都同样充满了神秘的诱惑力。

[2] 加速度：描述速度变化的快慢和方向的物理量。速度的变化与这变化所用时间的比值，称为这段时间的“平均加速度”。如果这一时间极短（趋近于零），这一比值的极限称为物体在该时刻的加速度或“瞬时加速度”。加速度是矢量，它的方向就是速度变化的极限方向，常用单位为米/秒^2、厘米/秒^{2}等。

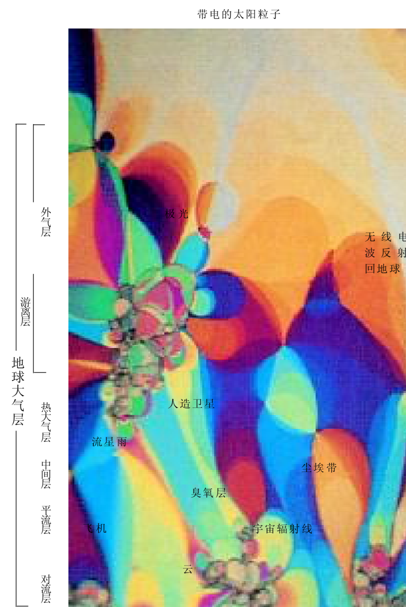


见物质的范围。

在类太阳系中，天体引力场将空间的氢氦原子束缚成球形的火球，在它的吸积盘上束缚着多颗行星，如太阳系的九大行星。在行星中，天体引力场将空间原子束缚成球形，在它的吸积盘上束缚着卫星，如土星、木星的光环。

在球形的天体引力场中，引力子流在球形的场内不停地向场中心旋转，最终回到场中心点，并从引力场轴（即天体自转轴）两端输出，开始第二次绕行。在黑洞引力场中，一些未消化的恒星物质就从引力场轴两端喷出，形成可见喷流。

在天体引力场中自转轴附近，引力最强。这是因为，从自转轴两端输出的引力子在此开始向内绕圈，而吸积盘离自转轴两端最远，所以得到的引力子流最少，引力最弱。在银河系中，银心黑洞已将球形的银河系内其他区域的绝大



地球大气层合成图片

大气层因地球的重力吸引而成，没有地球重力的吸引，就不会存在大气层，人类也就无法生存在地球上。大气层依不同的高度分许多层，离我们最近的是对流层，还有平流层、中间层、热大气层、外气层。

苏联第一颗原子弹　摄影

1949年下诺夫哥罗德州的萨罗夫研制出了苏联第一颗原子弹，苏联第一颗氢弹也诞生于此。



例如，一块铅锤和一块木头在一个引力场中，如果它们以静止状态或以同样的初速度开始下落，它们下落的方式将完全相同（在真空中）。这个定律是极其精确的，可以根据下列另一种不同的形式来表述。

按照牛顿运动定律，我们有：

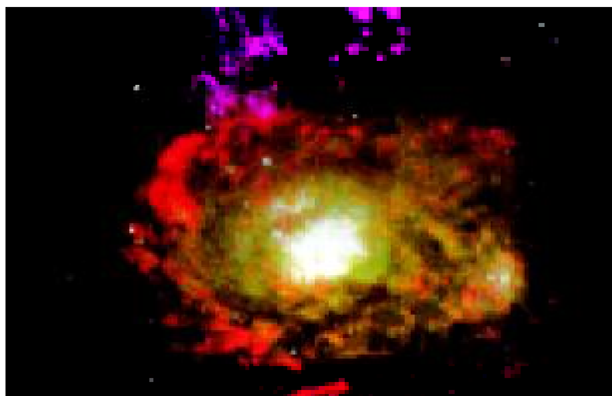
力 = 惯性质量×加速度

其中"惯性质量"是加速物体的特征常数。如果引力作用是引起加速度

部分物体吞噬，只剩下吸积盘（银盘）上的一些恒星、行星物质。由此可推测，银心黑洞的质量比过去认为的大得多，银心黑洞质量与银河系可见物质质量之比，应该超过太阳系中的太阳质量与九大行星质量之比。

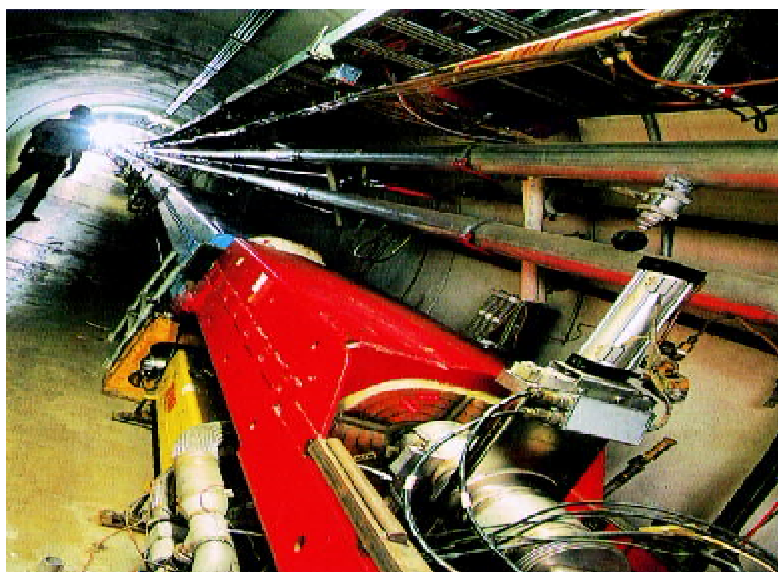
M87星系中心的黑洞　太空摄影

根据广义相对论，引力场将使时空弯曲。当恒星的体积很大时，它的引力场对时空几乎没什么影响，从恒星表面上某一点发的光可以朝任何方向沿直线射出。而恒星的半径越小，它对周围的时空弯曲作用就越大，朝某些角度发出的光就将沿弯曲空间返回恒星表面。等恒星的半径小到一特定值，就连垂直表面发射的光都被捕获了。到这时，恒星就变成了黑洞。这幅图是用哈勃望远镜拍摄到的M87星系中心的一个黑洞。



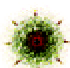
天体引力场的球形漩涡非常大。比如，太阳的集成引力场直径超过整个太阳系的直径，这样才能束缚住太阳系的所有天体。银心黑洞引力场的直径只有超过银冕直径，才能束缚住银河系内的所有天体，才能与其他星系组成星系团。

正因为天体引力场的引力子只能从自旋轴两端输出，使引力场的分布不均匀，在自转轴附近的引力最强，吸积盘附近的引力最小。这也造成大天体都是椭球形的。在自转轴附近引力大些，因此扁平一点；吸积盘附近引力小，因此凸起一点。引力场的这种特性与磁场相似，两个磁



离子对撞机
摄影

科学家利用威力强大的新粒子加速器来模拟宇宙创生时刻的环境，这种加速器被称为“相对论性重离子对撞机”。它让两束接近光速运行，但方向相反的原子核迎头相撞。这些原子核之间的成对碰撞，产生出极其巨大的物质能量，模拟了大爆炸最初几微秒内发生的情况。这些短暂的微型大爆炸给物理学家提供了近距离观察创世之初的绝佳机会。

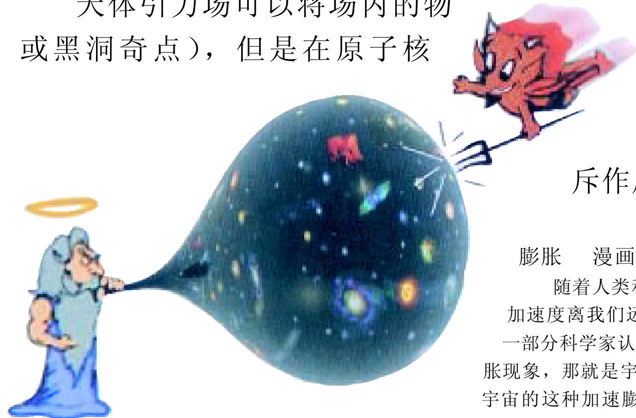


极相当于引力场自转轴两端，与两个磁极中心点垂直的地方磁场强度最小。在地球引力场的自转轴附近，引力应该是最强的；与自转轴垂直的吸积盘附近，引力应该是最弱的。

宇宙的星系中，约80% 是漩涡星系，15% 是椭圆星系，其余5% 是不规则星系（包括特殊星系）。椭圆星系的中心也有一个巨型黑洞，其所束缚的可见物质的范围也是椭球形的，它逐渐向漩涡星系发展，只在黑洞引力场的吸积盘附近留下可见物质，其他区域的物质会先被黑洞引力场吸入。

黑洞引力场由恒星的集成引力场演变而来，所以，引力场中引力子运行路线大致相同。唯一不同的是，恒星的集成引力场还需要束缚住氢氦原子，作为引力之源，黑洞引力场则已演变成纯引力场。

天体引力场可以将场内的物质吸入场中心（如太阳或黑洞奇点），但是在原子核引力场中却无法做到这一点，因为有核子的强核力、电磁力、弱核力的反斥作用。所以，原子核引力场束



膨胀　漫画

随着人类科学的进步，人们发现宇宙中的星系正在以加速度离我们远去，也就是说，宇宙的确在加速膨胀。有一部分科学家认为，只有一种现象才能解释这种“加速”膨胀现象，那就是宇宙中确实存在一种“暗能”，正是它引起了宇宙的这种加速膨胀现象。

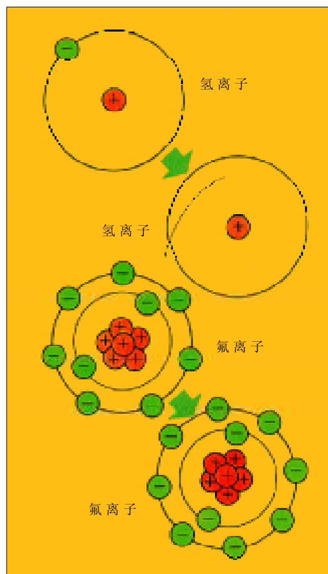
的原因，我们有：

力 = 引力质量×引力场强度

其中“引力质量”同样是物体的特征常数。从这两个关系式得出

$$加速度 = \frac{引力质量}{惯性质量} \times 引力场强度$$

如果我们从经验中发现，加速度与物体的种类和状态无关，而且在同一个引力场下，加



等离子状态　　示意图

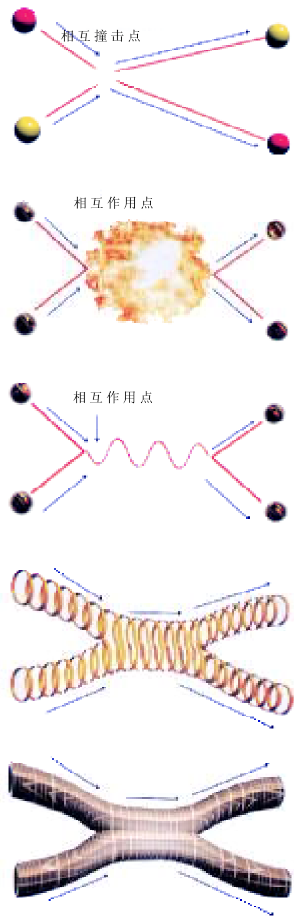
等离子状态是指物质原子内的电子在高温下脱离原子核的吸引，使物质为正负带电粒子状态存在。　我们知道，把冰加热到一定程度，它就会变成液态的水，如果继续升高温度，液态的水就会变成气态，如果继续升高温度到几千度以上，气体的原子就会抛掉身上的电子，发生气体的电离化现象，物理学家把电离化的气体就叫做等离子态。

缚着电子呈球状环绕运行，场中的引力子运行路线与天体引力场相同，因此构成的原子也是椭球形的，与天体相似。

大天体（如太阳、地球）之所以有如此强大的引力子流输出，去束缚远距离的物质，是因由原子构成的天体有一种“集成引力场”。

集成引力场和黑洞引力场具有以下特征：无论增加或减少质量，始终保持一个独立的球形引力场，引力场的大小和强度，随着质量增加而增加，随着质量减少而减少。天体引力场的这种性质与磁场相似，如将永磁铁分割成几块，每一块都能保持独立的磁场。

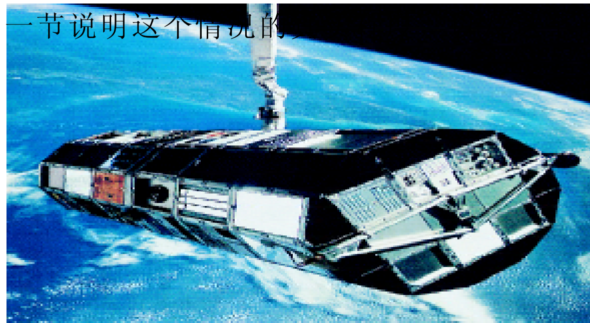
黑洞是一种不可见的球形引力场，在场中心有一个无形的点，即“黑洞奇点”。黑洞引力场的所有引力子都从这个点穿过。黑洞奇点的体积为0，每秒都有很多的引力子从奇点穿过，任何物体



粒子间的相互作用　　合成图片

自然科学发现了物质与物质之间所有的都相互作用吗？物质是由粒子构成的，并由粒子间的相互作用所控制。物质之间的相互作用可以归结为粒子与粒子之间的相互作用。可以说，一种相互作用就是一对粒子间的相互作用。在这种相互作用中，存在的粒子可以消失，粒子的总数在反应中可以改变，不变的只是系统的总能量和动量、角动量、重子数等。

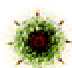
速度总是相同，那么引力与惯性质量的比对于一切物体而言也是一样的。适当地选择单位，我们可以使这个比相一致，我们因而就得出物体的引力质量等于其惯性质量这一定律。这个定律过去确实在力学中已经存在，但是没有得到解释。我们唯有承认物体的相同的性质，按照不同的处境表现为“惯性”或“重量”这一事实才能得到满意的解释。我们将在下一节说明这个情况的……问题与广义相对性的假设是如何联系起来的。



双暴胀可以怀有智慧生命　　我们自己的宇宙现在继续膨胀

时空弯曲　合成图片

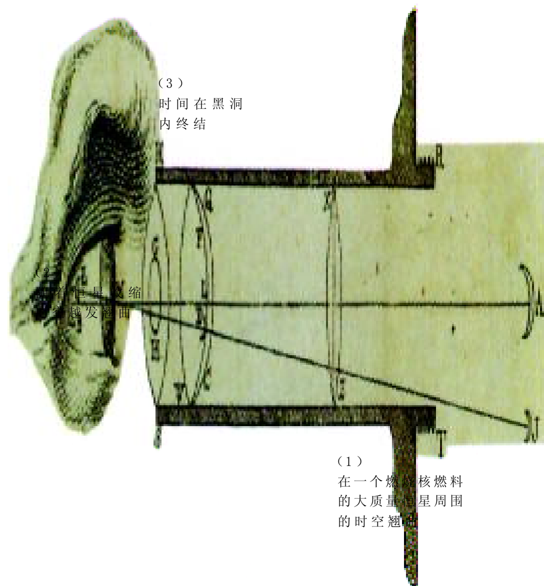
爱因斯坦广义相对论的基本论点是：引力来源于弯曲。正是太阳或巨其质量，引起或迫使其周围的空间发生了弯曲（或者说产生了引力）。正是“空间弯曲”影响着行星和光的运动，使它们不按照牛顿力学所描述的方式，而是不得不按照现在实际存在的方式运动。



接近黑洞奇点都会被极强的引力子流击碎。如果黑洞质量足够大，引力子流密度足够高，就能及时将粒子破碎后的反引力子转化成引力子；如果吸入恒星物质超过黑洞能有效吸收的量，它们就会通过黑洞引力场轴即自转轴两端喷射出来。

黑洞的自转方向与其引力场拉曳外围可见物质的转动方向相同。

黑洞的引力之所以远大于同质量的恒星，是因黑洞是纯引力天体，从恒星、中子星到黑洞的演化过程中，引力场最终战胜反引力场，即引力最终战胜强核力、电磁力、弱核力，并将中子星中的大部分反引力子转化成引力子，这使得黑洞的引力子翻倍。并且，黑洞引力场已没有了反引力场的制衡，可以将全部引力子输出，形成强大的“黑洞引力场”。而恒星



时空翘曲　合成图片

翘曲飞行很容易让人想到虫洞——那是索恩为萨根小说《接触》中的超空间旅行构想的。不过，虫洞作为时空旅行手段毕竟是出自物理学家有理论依据的建议的结果，一出来就备受关注，而翘曲飞行理论则完全是幻想的结果。





法国科学院　摄影

法国科学院前身为1666年J.B.科尔贝尔创建的学会。1699年，在法国王室的赞助下改组，学会改用现名并迁往卢浮宫。法国大革命时期，国民公会于1793年取缔了科学院和其他王室学会。1795年，由新建国立研究院的一个分支机构接管科学院的工作。1816年恢复原名，成为法兰西研究院的5个组成机构之一。

却要从原子中汲取引力子，必须维持有形结构，其引力场时刻与强核力、电磁力、弱核力组成的反引力场抗衡着。

反引力子的直线向外性，使反引力场不能独立存在，必须与引力场形成相互制衡之势，才能稳定。不然，反引力场就会像水波一样不断向外辐射，直至消失，就像电磁辐射。所以由反引力分化成的强核力、电磁力、弱核力都是以粒子为载体，以光速或亚光速运行，粒子则是反引力场与引力场相互制衡的平衡体。引力场可以独立存在，最明显的是黑洞引力场。宇宙空间运行的部分超光速反引力子来源于黑洞。因为黑洞未能及时将部分反引力子转化成引力子，它们从黑洞引力场轴两端喷出，使随同喷出的可见粒子获得极大动能，因此黑洞喷流能量极大。

从星系中心黑洞引力场喷出的强大反引力子流，是致使宇宙加速膨胀的暗能量来源。由于这些反引力子来源于黑洞吸入的粒子级物质，当宇宙进入黑洞期（约1 000亿年后），黑洞引力场可吸入粒子级物质逐渐减少，宇宙暗能量将逐渐消失。那个时候，引力远大于反引力，宇宙停止膨胀，在众多黑洞引力场的相互吸引下，它开始收缩，并最终融合成一个极大的宇宙黑洞，进而坍缩成“宇宙奇点”。

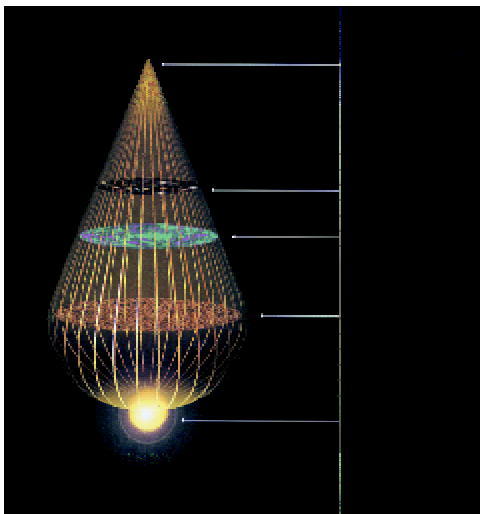


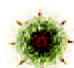
霍金在讲课　摄影

霍金于1965年进入剑桥大学冈维尔和凯厄斯学院任研究员。这个时期，他在研究宇宙起源问题上，创立了宇宙之始是“无限密度的一点”的著名理论。图为他在讲课时的情景。

宇宙的起源与发展　合成图片

关于宇宙的起源，霍金表示，把广义相对论和量子理论相结合，才能帮助了解宇宙的起源，并可预言宇宙是如何起始的。而宇宙和时间本身都在大爆炸处开始，时间也会在黑洞里终结。





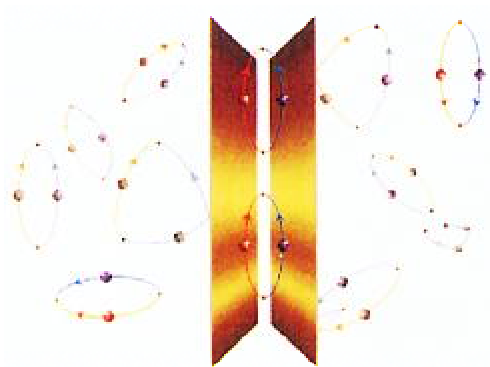
太阳系以每秒230公里的速度完成它围绕银河系中心的运行，银河系则以每秒90公里的速度接近它的伴星系——仙女星系。它们俩都属于绵延约1000万光年的“本星系群”，这个本星系群又以每秒约600公里的速度移动，被室女星系团吸进本超星系团。本超星系团的范围约6 000万光年。本超星系团、长蛇座与半人马座超星系团，又落向另一个更大的星系集团，天文学家称之为“大引力源”。这些星系团与超星系团，形成了范围有几亿光年大的垣状和丝状结构，这些垣状和丝状结构很像生物体内的细胞组织。

时空曲率在黑洞奇点中并没有出现无限大。当引力子从黑洞奇点（引力场中心点）中穿出时，时空曲率从极大走向了反面，出现了短暂的平直时空，即黑洞引力轴（自转轴）的两处直线喷流。球形的天体引力场中的时空是弯曲的，而且越接近球形引力场中心，时空弯曲度越高，因为引力子呈螺旋形向内旋转。

是什么束缚着电子以光速围绕原子核运行？是什么束缚着太阳系九大行星长期围绕太阳运行？是什么束缚着银河系千亿颗恒星围绕着银心运行？为什么它的运行规律如此相似？是因为它们受到同一种力的束缚，那就是引力。为什么小到粒子、原子、水珠、球状病毒、细胞，大至行星、恒星、星系、宇宙，自然界中有非常多的物体都呈球形？这是因为，宇宙中存在球形引力场和球形反引力场在相互对抗、相互协同，而这些球形的形成是一种平衡、对称的表现。

2.3 惯性质量和引力质量相等是广义相对性公设的论据

我们设想在真空中有一个巨大的物体，而且距离众多的星体和其他可感知的质量非常遥远，已经接近伽利略基本定律所要求的条件，我们可以为这部分空间（世界）选取一个伽利略参考物体，使对处于静止状态的点继续保持静止状态，对作相对运动的点永远



卡西米尔效应　合成图片

空的空间充满了虚粒子和虚反粒子。对于这些粒子——对金属板作用犹如镜子，在它们之间只允许具有一定共振波长的虚对。这就是所谓的卡西米尔效应。

附：

惯性

物体保持原来匀速直线运动状态或静止状态的性质叫惯性。

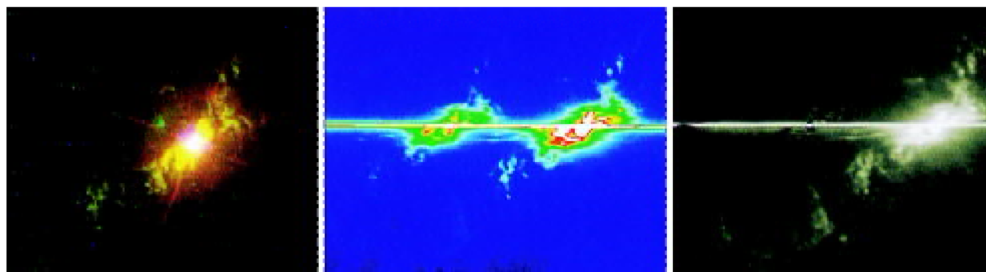
质量·惯性质量·引力质量

量度物体惯性大小和引力作用强弱的物理量，即表示“物质有多少量”。物体所受外力和由此得到的加速度之比，即为惯性质量。在相同外力的作用下，惯性较大的物体得到的加速度较小，也就是它的惯性质量比较大。物体之间的万有引力也由它们的质量决定，这种反映引力作用强弱的质量成为引力质量。物体所受的重力就是地球与物体间引力作用的



加速或自由下落　合成图片

这幅合成图是用来研究物体加速或自由下落时的状态的。在一个盒子中的观察者无法区分两种情形：（a）处于地球上的固定的升降机中和（b）在自由空间中被火箭加速。如果火箭关闭发动机（c），其感觉就像和升降机向通道底部自由下落一样（d）。

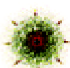


宇航员　合成图片

相对论的提出，使人们探索遥远的星系，穿越时空的旅行成为理论上的可能。这幅图就描绘了宇航员在太空中的情景。

保持匀速直线运动。我们把一个类似于房子的极宽大的箱子当做参考物体，在里面有一个配备仪器的观测者。对观测者来说，引力[1]是不存在的，除非他用绳子把自己牢牢拴在地板上，否则只要有轻微的碰撞他就会向房子的天花板方向慢慢地漂浮起来。

[1] 引力：物体受到拉力作用时，存在于其内部而垂直于两相邻部分接触面上的相互牵引力。



反映，因而在同一地区，各物体所受的重力分别与其质量成正比。在现用单位制下，实验证明，这两种不同定义的质量实际上大小相等，所以人们不再区分它们，而统称为质量。

惯性质量与引力质量的关系

按照牛顿第二定律，一个物体的加速度与它的质量——惯性质量——成反比，而同它所受的力成正比。当物体在地面附近自由下落时，受到的主要是重力，即万有引力，应该与物体的引力质量成正比。如果我们忽略空气阻力等次要因素，则物体下落的加速度取决于引力质量与惯性质量之比。但是，从伽利略时代开始人们就已经认识到，不同的物体，不管它的形状、重量等如何不同，当它们从同一地点的同一高度同时自由下落，就总是同时到达地面。

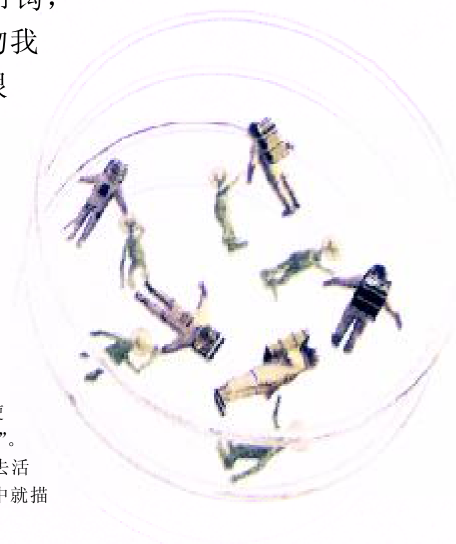
当两个物理量总是成正比时，我们总可以选取适当的单位，使其比例常数为1，并把它们说成是相等的。因此，通常我们都认为，引力质量与惯性

单孔实验　示意图

人们可以通过自己演示来分析光波的本质。举起一只手，手掌面向自己，五指并拢，然后稍微分开两个手指。在指间的狭窄缝隙中，可以看到两条黑线。这是由于光波沿着手指形成狭缝的边缘相互干扰造成的。



在箱盖正中有一个系有绳索的吊钩，设想有一“生物”（是何种实质的生物我们无须考虑）开始以恒力用力拉这根绳索，于是箱子及观测者一律开始作匀加速的“向上”运动。倘若从另一个参考物体来观察，我们会看到，随着时间的推移，它们的速度将会达到一个未可预知的值。



航天　合成图片

所谓“航空”，就是人类在地球大气层中的活动，所使用的飞机、直升机、飞艇和气球等飞行器统称为“航空器”。所谓“航天”，就是人类冲出地球大气层，到宇宙太空中去活动，即宇宙航行。它所使用的是航天器及其运载火箭。图中就描绘的是航天的景象。

质量相等。

1889 年，厄缶做了极其灵敏的扭秤实验，比较引力质量和惯性质量。惯性质量与引力质量等价的事实，后来成了广义相对论的重要依据。

等效原理的两个直接推论

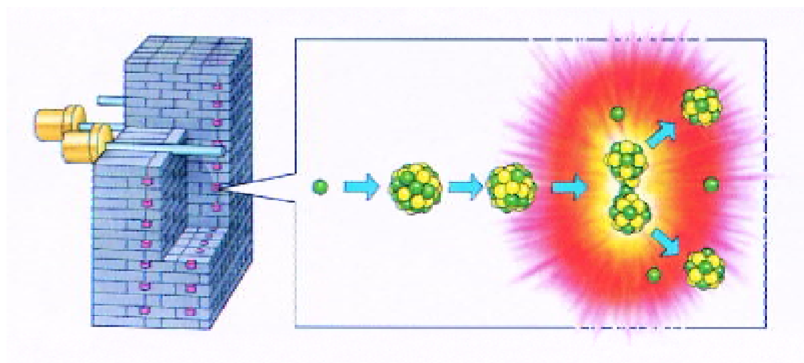
推论一：光线被引力场弯曲

在牛顿力学中我们知道，当引力场中抛出一个物体时，它的轨迹不是通常的曲线，而是一条叫做“抛物线”的曲线。这是物体受到引力作



列宁格勒大学　摄影

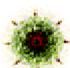
圣彼得堡国立大学又称“列宁格勒大学”，世界最优秀的大学之一，世界排名在28位。圣彼得堡国立大学坐落在涅瓦河北岸与冬宫遥相对应，1724年创建，是俄罗斯最早建立的大学之一，比莫斯科大学早32年，是著名的综合性大学，也是俄罗斯教育、科学和文化中心之一。



粒子的裂变示意图

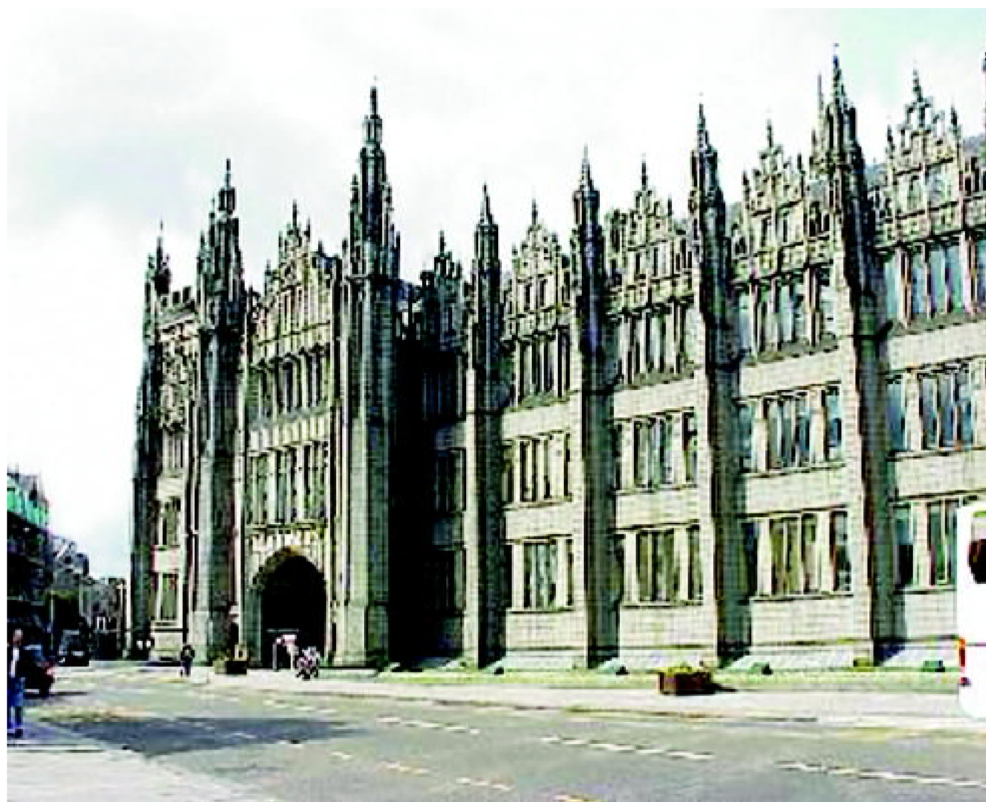
人们制造了大能量的加速器来加速电子或质子，企图用这些高能量的粒子作为炮弹轰开中子或质子来了解其内部结构，从而确认它们是否是“真正的基本粒子”。但是，令人惊奇的是在高能粒子轰击下，中子或质子不但不破碎成更小的碎片，而且在剧烈的碰撞过程中还产生许多新的粒子，有些粒子的质量比质子的质量还要大，因而情况显得更为复杂。

但是箱子里的人经历了怎样一个过程呢？观测者接受的加速度是通过箱底的反作用力得到的，如果他不愿意在箱底像喝醉了似的漂浮起来，那么就必须在箱子里能够有固定的支撑点。所以，他在箱子里实际上与在地球上的房间里完全一样。如果他松手放开握在手中的一个物体，没



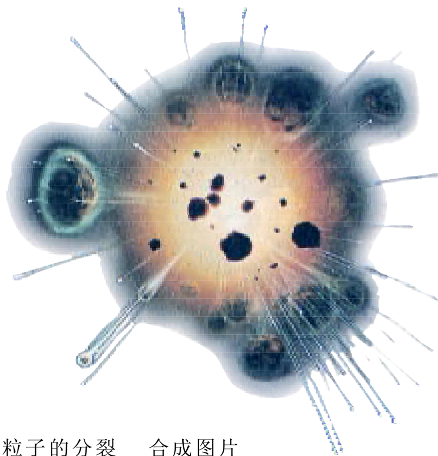
阿伯丁大学　摄影

阿伯丁大学建于1495年。它是一所古老的大学，以校龄计算，在苏格兰排名第三，在全英国排名第五。



有了箱子施予加速度的物体必然作加速相对运动而落到箱底。因此观察者将会进而断定，不论用来做实验的物体是什么，它向箱子底板的加速度总是有相同的量值。

观测者依靠对引力场知识的了解（如同在前面部分所讨论的），他将会得出一个结论：他和箱子处于一个引力场中，这个引力场对于时间而言是恒定不变的，当然他也会为箱子为什么在这个引力场中并不下落而疑惑。但当他发现箱盖的钩子上系着绳索后，就会得出箱子是静止地悬挂在引力场



粒子的分裂　合成图片

当部分太极粒子首先在一个空间区域内开始分裂，并在宇宙中同时出现了数量相等的正、负粒子以后，在宇宙中就形成了一个太极粒子的分裂区，而正、负粒子的出现，则拉开了正、反物质发展和演化的序幕。

用的结果。但是经典物理学对于光线是否会受到引力场的影响，却并无定论，并且，在人们看来，光线在任何情况下都应该是直线行进的。人们常把光线当做“直线”的标准。当今世界确定直线的最精确的仪器“激光准直仪”，也是以激光束作为标准的。

但是，光线在受到引力场的影响时，肯定要“走弯路”。因为，在无引力空间的一个惯性系内，光线当然是沿直线行进的。设：一束光线射向一只静止的电梯A，则光线是直的，这个无悬念。现在，让电梯A沿着与光线垂直的方向做加速上升运动。这时，电梯里边的人看到光线在匀速地横穿梯舱的同时，一个向下的加速运动，让光线成了一根向下的曲线——抛物线。当然，就电梯A而言，这只不过是它相对于某个惯性参考系做加速运动的结果。根据等效原理，光线从做加速运动的电梯A中垂直射出时，也会被同样弯曲。

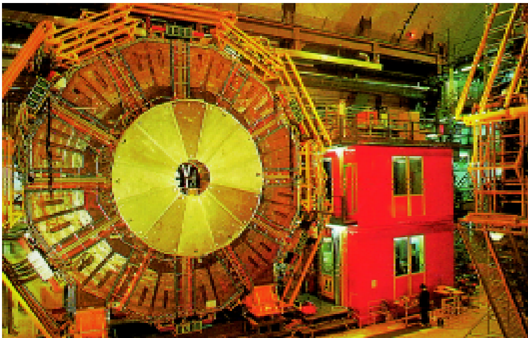
所以，作为等效原理的推论，光线的确应该被引力场所弯曲。只是，除非引力场很强，这个效应一般都难以察觉。

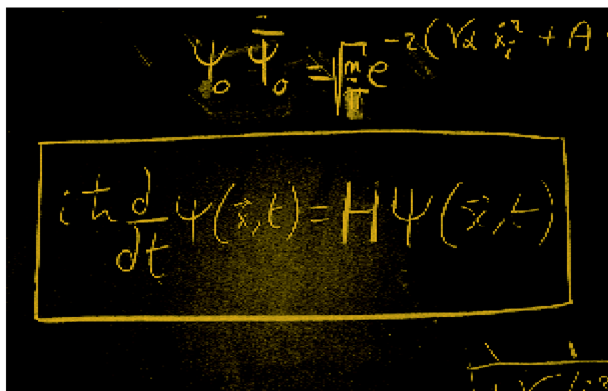
推论二：引力红移

等效原理的第二个直接推

离子加速器　摄影

离子加速器在今天社会中得到广泛的应用，尤其是在一些研究历史的高深工作中，因为科学家可以利用它在实验室的小范围内重现宇宙大爆炸初期的情形。





薛定谔方程　摄影

薛定谔方程是量子力学中的一个基本方程，也是量子力学的一个基本假定，其正确性只能靠实验来检验。

中的结论。

我们是否应该一笑置之，说这个人的结论错了呢？我认为我们不应该这样说，如果我们希望能保持一致的话。我们必须认可，他的思想方法既不违反理性，也不违反众所周知的力学定律。即使我们先认定箱子相对于“伽利略空间”在做加速运动，但也能够认定箱子是在静止中。相对性原理囊括了所有相互做加速运动的参考物体，这也是相对性

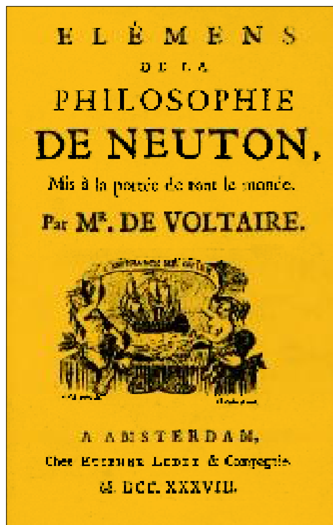


论，是光波在传播时会改变它的频率，使光谱线的位置产生移动。这就是引力红移（实际上，谱线既可以向长波方向移动，称为“红移”，也可以向短波方向移动，称为“蓝移”，不过通常统称“红移”，对“蓝移”则用“红移量为负值”表示）。

证明如下：假设电梯 A 的舱底有一光源，它发出的光的频率为 v_0，以窗顶处的接收器加以接收。发光的瞬间，光源相对于某惯性系是静止的。由于 A 的加速上升，当接收器在稍后的时刻接到这个光信号时，它相对于那个惯性系已经不再静止，而是向上运动着，其瞬时速度等于 A 舱的加速度与光讯号传播时间之积。接收器相对于光源的这个运动会产生多普勒效应，就好比一列离我们远去的列车的汽笛音调会降低一样。接收器所接收到的光讯号频率小于 v_0，就是说发生了“红移”。

引力红移的预言，在 1919 年的天文观测中被证实。

另外，引力红移也暗示着不同地点的标准钟会有不同的走时速率。



拉格朗日分析力学　书影

拉格朗日的《分析力学》一书，这是牛顿之后的一部重要的经典力学著作。书中运用变分原理和分析的方法，建立起完整和谐的力学体系，使力学分析化了。他在序言中宣称：力学已经成为分析的一个分支。

公设推广的一个强有力的论据。

我们必须充分且谨慎地看待这种解释方式的可能性，这种解释的基础由引力场使一切物体得到同样的加速度这一基本性质而来。换句话说，它是以惯性质量和引力质量相等这一定律为基础所得出的。如果这个自然定律不存在，那么处在做加速运动的箱子里的人就不可能假定出一个解释周围物体行为的引力场来，也无任何理由假定他的参考物体是“静止的”。



失重　示意图

所谓失重，就是重力为零，即零重力。所谓重力，是物体所受天体的引力。就质量一定的天体来说，物体离它越远，所受它的引力越小，即重力越小，在足够远的距离上，它的引力可以忽略不计。但宇宙中不只一个天体，众多天体的引力会形成一个引力场。

假如箱子里的观测者在箱盖里面固定好一根绳子，然后在绳子的另一端拴上一个物体，绳子受张力而使该物体“竖直地”悬浮。如果我们寻找一下致使绳子产生张力的原因，箱子里的人会说：“引力场中向下的力作用于物体，又为绳子的张力所平衡，所以该物体悬浮在空中。决定绳子张力大小的是悬浮物体的引力质量。”另一方面，稳定在空中的自由观察者对这一情况的解释是：“绳子必然参与箱子的加速运动，并传送此运动到拴在绳子上的物体。紧绷的绳子张力的大小正好足以引起物体的加速度。物体的惯性质量决定了绳子张力的大小。”这个例子可以看出，惯性质量和引力质量相等这一必然的定律隐含在相对性原理的推广中，我们也得到了这个定律的一个物理解释。

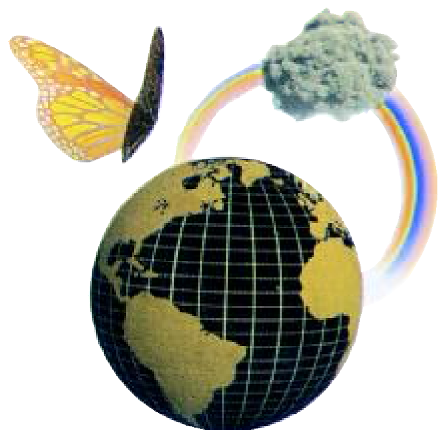


加速仪　合成图片

惯性是物体保持静止状态或匀速直线运动状态的性质。一个物体，只要不受外力作用，原来静止的就会一直静止下去，而原来运动的则会一直做匀速直线运动。加速仪就是利用了这个原理进行工作的。

对做加速运动的箱子的讨论使我们看到，广义的相对论对引力诸定律产生的重要结果是毋庸置疑的。实际上，对广义相对性观念的全面研究已经为引力场补充了好些定律。在继续



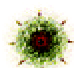


蝴蝶效应　合成图片

蝴蝶效应是气象学家洛伦兹1963年提出来的。此效应说明，事物发展的结果，对初始条件具有极为敏感的依赖性，初始条件的极小偏差，将会引起结果的极大差异。

谈下去以前，我必须对读者发出警告，切不可全盘接受这些论述，因为在其中隐含了一个错误的概念。对于最初选定的坐标系，并没有一个引力场，但对于箱子里的人却存在有这样的场。于是我们可能会很容易地假定，引力场的存在永远只是唯一的表观存在。我们同样也可以认为，不论何种引力场存在，我们总能选取另一个参考物体，使得引力场对于该参考物体而言是不存在的，当然，这绝不是绝对的断言，而仅仅是对具有十分特殊的形式的引力场才成立。例如，我们不可能任意选取一个参考物体，而由该参考物体来判断地球的引力场（完整的）会为0。

现在我们能够认识到，为什么我们在本篇第一节所叙述的观察者由于刹车而感到有一种朝前的冲动，而且认识到车厢的非匀速运动（阻滞）。但是没有任何人强迫他把这种朝前的冲动感归于车厢“真实的”加速度（阻滞），因而他可以这样解释他所经历的事件：“我的参考物体（客车车厢）一直保持静止状态。但是，相对于这个参考物体而言，存在有（在刹车期间）一个方向向前的，而且对于时间而言是可变的引力场。在这个场的影响下，路基连同地球以它们向后的原有速度在不断减小的速率中做非匀速运动。”



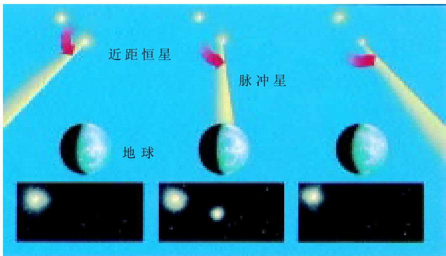


探测太空　合成图片

随着航天技术的诞生，人类开始利用新兴的航天器探测太空的各种自然现象及其规律，同时借助地球外层空间的微重力、高真空、超低温、强辐射、高洁净和高远位置等特殊环境，开展各项科学研究和工艺实验，从而大大扩展了人类的活动范围，促进了空间科学向着更深、更广的领域发展。

2.4 经典力学和狭义相对论的基础有哪些不能令人满意的方面

我们已经说过，经典力学从以下定律出发：远离其他物质粒子的质点继续做匀速直线运动或继续保持静止状态。我们也再三强调，这个基本定律仅仅对一些具有某些特别的运动状态并相对作匀速平移运动的参考物体



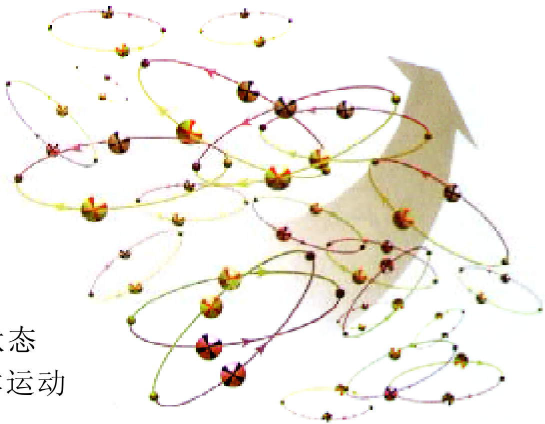
脉冲星自旋　合成图片

脉冲星被公认是快速自旋的中子星。中子星是一种几乎整体均由中子组成的极端致密的恒星，其直径仅20公里，甚至更小些。当超新星激烈爆发后，其内核向内坍缩，即形成为中子星。恒星表面处的中子衰变成质子和电子，这些荷电粒子从恒星表面释放出来，即进入环绕恒星并随恒星自转的强磁场之中。这些粒子被加速到接近光速，便产生称为同步加速辐射的电磁辐射。这种辐射从脉冲星的磁极处以强射束形式被释放出来。磁极并不和自转极吻合一致，因此，脉冲星的自转致使射束旋转摆动。



附：

经典力学的基础



粒子分解图　示意图

粒子物理学是研究基本粒子及其相互作用的学科。它是狭义相对论和量子力学结合的结果，也叫量子场论。由于涉及相对能量高的粒子，所以又称为高能物理。基本粒子是目前人们所知的，构成物质的最基本的单元，比如电子、夸克等。

经典力学的基础也就是牛顿运动定律。

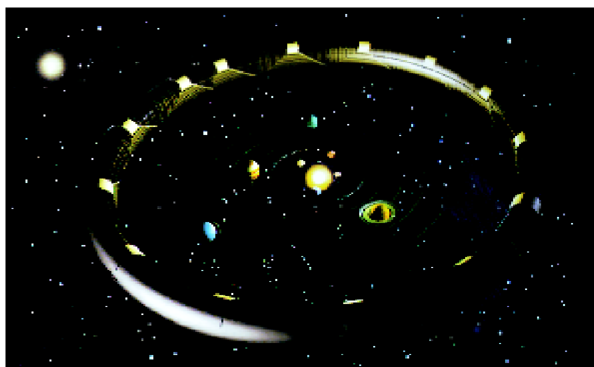
一、牛顿第一定律

内容：物体将保持静止或作匀速直线运动，直到其他物体对它的作用力迫使其改变这种状态为止。牛顿第一定律阐明了物体运动的如下本质规律：

1. 物体运动的惯性。由牛顿第一定律可知，物体之所以静止或做匀速直线运动是由于物体的本性造成的。这种本性叫做物体运动的惯性。

2. 惯性的大小可以使用一个物理量——质量来描写。这个质量也称为物体的惯性质量。在国际单位制中，质量的单位是千克（kg）。物体质量越大，惯性越大，保持原有运动状态的本领越强。

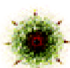
3. 牛顿第一定律阐明了力是改变运动状态的原因，而不是维持物体运

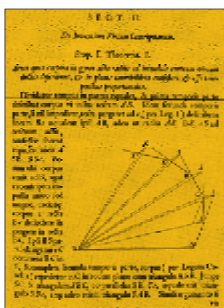


探测普朗克长度　合成图片

需要用于探测普朗克长度那么小的距离的加速器的尺度会比太阳系的直径还要大。

K 才有效。相对于其他作平移直线运动的参考物体，这个定律就失效。所以在经典力学和狭义相对论中，我们都把二者区分开来。公认的“自然界定律”相对于参考物体 *K* 来说是成立的，而相对于另一些参考物体 *K*，则这些定律不成立。但是，凡是思想模式合乎逻辑的人是不会满意此种解答的，他会问：“为什么认为某些参考物体（或它们的运动状态）比另一些参考物体（或它们的运动状态）要优越，此种偏爱的理由是什么？”





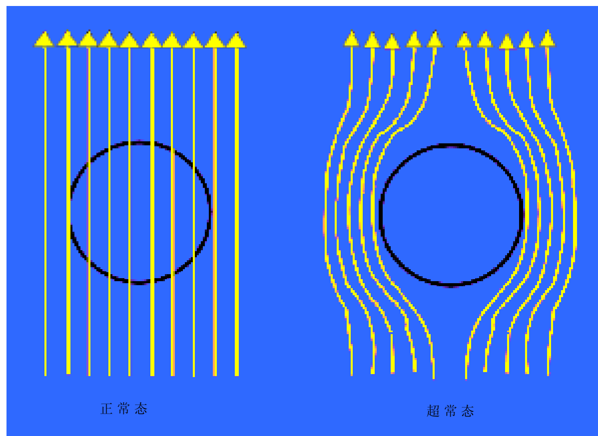
SECT. II

微积分著作　书影

牛顿和莱布尼兹对微积分的创建都作出了巨大的贡献，但两人的方法和途径是不同的。牛顿是在力学研究的基础上，运用几何方法研究微积分的；莱布尼兹主要是在研究曲线的切线和面积的问题上，运用分析学方法引进微积分要领的。

迈斯内效应　示意图

当金属处在超导状态时，这一超导体内的磁感应强度为零，即能把原来存在于体内的磁场排挤出去。他们对围绕球形导体（单晶锡）的磁场分布进行了实验测试，结果惊奇地发现：锡球过渡到超导态时，锡球周围的磁场都突然发生了变化，磁力线似乎一下子被排斥到超导体之外去了。于是，人们将这种当金属变成超导体时磁力线自动排出金属体之外，而超导体内的磁感应强度为零的现象，称为“迈斯内效应”。



动状态的因素。这是牛顿的一个重大发现。在牛顿之前人们一直认为力是起维持物体运动状态的作用。

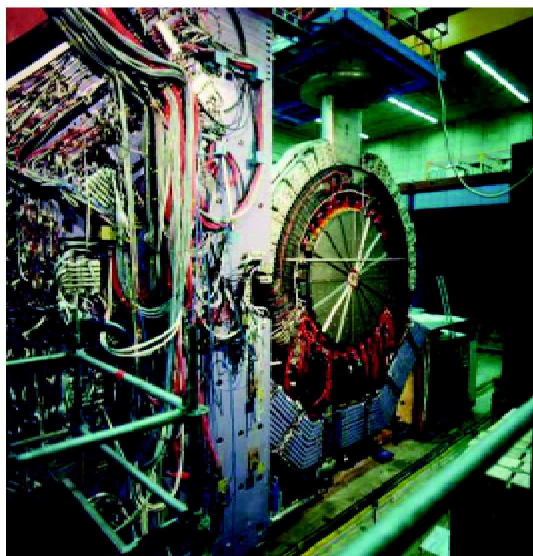
二、牛顿第二定律

内容：物体受到外力作用时将产生一个加速度，加速度的大小与合外力的大小成正比，与物体自身的质量成反比，加速度的方向在合外力的方向上。

牛顿第二定律是牛顿第一定律逻辑上的延伸，它进一步定量地阐明了物体受到外力作用时运动状态是如何变化的（使物体产生一个加速度）。牛顿第二定律定量的数学表达式为

为了让我的问题更为明朗清晰，我来做一个比喻。

假如我站在一个煤气灶旁。灶上并排放着两个非常相像且都盛着半锅水的平底锅。我注意到蒸汽从一个平底锅中不断冒出，而另一个锅则没有。对此情况我会感到惊讶，即使如果



对撞机 摄影

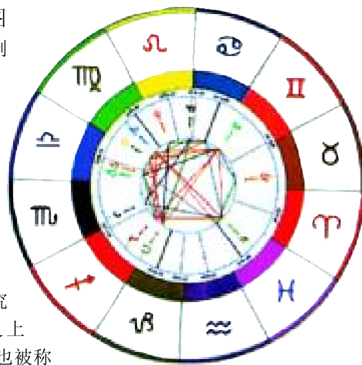
目前建造使用的对撞机有正负电子对撞机 、正反质子对撞机和质子－质子对撞机。带电粒子经加速器预加速，再注入环形真空室（贮存环）中“贮存”起来；在贮存环中积累到较高的密度，并加速到一定的能量，再用于对撞。

$$F=kma$$

在国际单位制下，力是以牛（N）为单位，加速度以 m/s^2 为单位，质量以 kg 为单位，这时 k=1，故有

$$F=ma$$

上式是矢量的形式的，也叫做牛顿运动方程。在牛顿定律的应用中，大家特别要注意的是第二定律中的 F 是物体所受的合力。



占星术 示意图

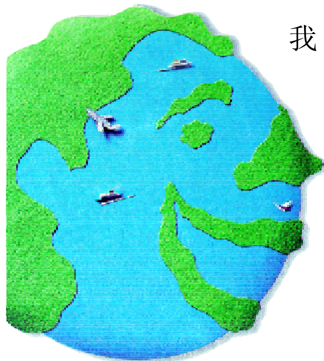
人类总想控制未来，或者至少预言将来发生的事情。这就是占星术如此流行的原因。占星术宣称，地球上的事件和行星划过天穹的运动相关联，它的理论是建立在研究宇宙星象的基础之上的，因此，占星术也被称为“科学的迷信”。

在某些情况下，物体所受的力为恒力，物体具有的加速度为匀加速度，例如自由落体运动，这时力与加速度都不随时间 t 变化。但是更普遍的情况表现为物体所受的力为变力，力的大小方向都可能发生变化，相应物体的加速度也是变化的，这时物体的加速度与力在时间上应表现为一一对应的关系。

三、牛顿第三定律

内容：牛顿第三定律有多种表述形式，这里只介绍一种较常见的表述，即物体之间的作用力与反作用力大小相等，方向相反，作用在不同的物体上。

牛顿第三定律在逻辑上是牛顿第一、第二定律的延伸。在第一、第

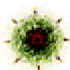


地球引力下运动的月球
合成图片

从地球上我们只能看到月球始终不变的一半，这是因为尽管月球始终转动，但在地球的引力下，始终是围绕着地球转动，所以我们看不到它的另一面。这种现象也是万有引力的体现。

我以前从没有过煤气灶或平底锅，也会感到奇怪。但如果我注意到在第一个平底锅下有蓝色的光，而另一个锅底下则没有，那么我不会再感到惊奇，即使以前我从来没见过煤气火焰。我敢说，是这种带蓝色的火焰使平底锅里冒出蒸汽，或者至少有这种可能。可是如果我注意到两个平底锅下都没有带蓝色的火焰，而且其中一个锅还在不断地冒出蒸汽，而另一个锅则没有，那么我将感到惊讶和迷惑，直到有明确的答案说明为什么这两个非常相像的平底锅有不同的表现为止。

类似的，在经典力学（或狭义相对论）中，为什么相对于参考系 K 和 K_1 来考虑时物体会



二定律中都使用了力的概念，但什么是力，力有什么特点都没有具体介绍。牛顿第三定律就是来补充力的特点和规律的定律。

根据牛顿第三定律，我们可以将力定义为：力就是物体间的相互作用。这种相互作用分别叫做作用力与反作用力。从牛顿第三定律我们知道作用力与反作用力之间有如下的特点：

1．作用力与反作用力大小相等，方向相反。力线是在同一直线上的。

2．作用力与反作用力不能抵消，因为它们是作用在不同的物体上的。

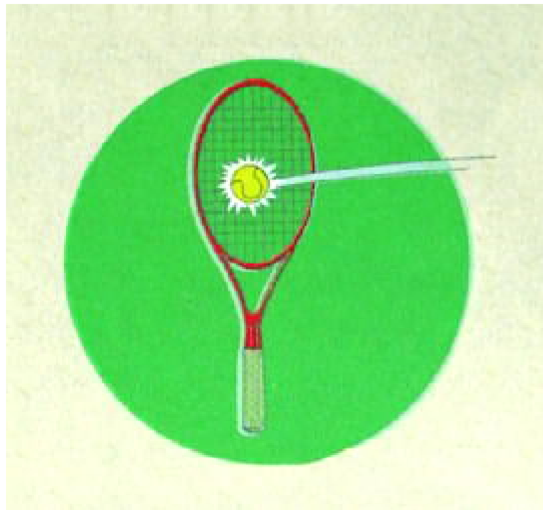
3．作用力与反作用力是同时出现，同时消失的；作用力与反作用力的类型也是相同的，如果作用力是万有引力，则反作用力也是万有引力。

四、牛顿运动定律应用中要注意的问题

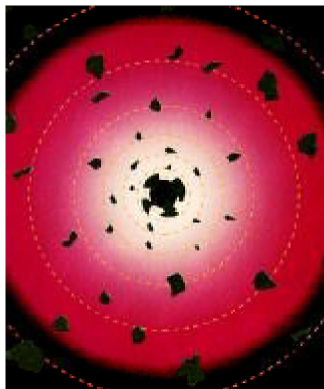
1．牛顿运动定律适用于质点。牛顿运动定律中的“物体”

力量与加速度　合成图片

牛顿的第二运动定律是指：当一个做匀速直线运动的物体受到外力作用时，速度就会发生改变，并且速度的改变与物体所受外力的大小成正比。牛顿的第二运动定律解释了为什么球拍击打小球的力量越大，小球的速度就越快。



有不同的表现这一问题，我没有找到什么实在的东西来说明。牛顿看到了这个缺陷，并曾试图使它趋于无效状态，但是没有成功。只有马赫看得最清楚，正因为如此，他宣称必须把力学放在一个新的基础上。借助与广义相对性原理一致的物理学，我们能够消除这一缺陷，因为这一理论的方程，对于不论其运动状态如何的一切参考物体，都是成立的。

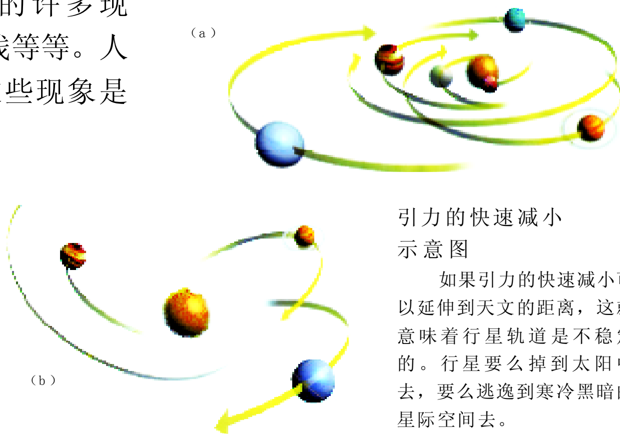


宇宙诞生模型　合成图片

乔治斯·勒迈特的宇宙膨胀理论，后来被称做“大爆炸理论”。早些时候，一位名叫亚历山大·弗里德曼的数学家提出一个与爱因斯坦及其他科学家使用的静态模型相悖的宇宙动态模型，但他的工作是数学化的。勒迈特把物理学和天文学的最新发现融入了他的理论。他提出，既然有证据表明各星系统在互相飞离，那么必有一个时期它们全都集中于他称为“古原子”的一点。这种物质和能量的高度集中可能导致了一次大爆炸，并使宇宙开始了膨胀的进程。此图是根据勒迈特的推测制作的宇宙诞生模型。

是指质点，或均针对质点成立。如果一个物体的大小形状在讨论问题时不能够忽略不计，可以将该物体处理为由许许多多质点构成的质点系统（简称为“质点系”）。质点系中每一个质点的运动规律都应当遵从牛顿运动定律。

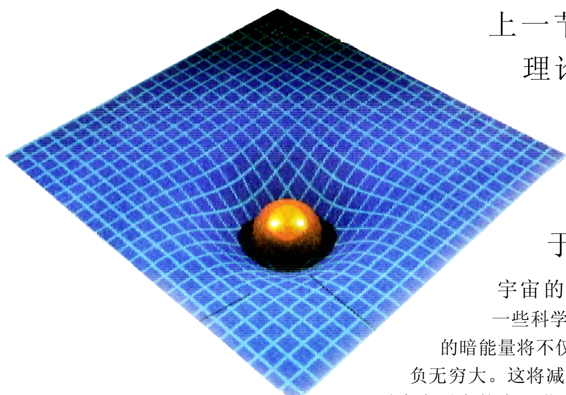
2．牛顿力学适用于宏观物体的低速运动情况。在牛顿于1687年提出著名的牛顿三大定律之前，人们对物质及其运动的认识还仅仅局限于宏观物体的低速运动。低速运动是指物体的运动速度远远小于光在真空中的传播速度。牛顿力学在宏观物体低速运动的范围内描述物体的运动规律是极为成功的。但是到了19世纪末期，随着物理学在理论上和实验技术上的不断发展，人类观察的领域不断扩大，实验上相继观察到了微观领域和高速运动领域中的许多现象，例如电子、放射性射线等等。人们发现用牛顿力学解释这些现象是不成功的。直到20世纪初，量子力学诞生，才对微观粒子的运动规律给予了正确的解释，而对于高速运动的物理图像，则必须用爱因斯坦的相对论进行讨论。



引力的快速减小示意图

如果引力的快速减小可以延伸到天文的距离，这就意味着行星轨道是不稳定的。行星要么掉到太阳中去，要么逃逸到寒冷黑暗的星际空间去。

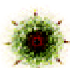
2.5 对广义相对性原理的几个推论



上一节表明，广义相对性原理能够在纯理论方式下推出引力场的性质。让我们来猜想一下，例如，我们已经知道任一自然过程的空间—时间“进程”在伽利略区域中相对于一个伽利略参考物体 K 是如何发

宇宙的坍塌　合成图片

一些科学家根据量子理论描述重力作用。他们声明，来自标量场的暗能量将不仅仅是简单地归于零 —— 它将变为负的，甚至可能远及负无穷大。这将减慢宇宙扩张的速率，并在一定时候，使宇宙反转，导致时空在反向的大吞噬中坍塌，最终成为一个点。

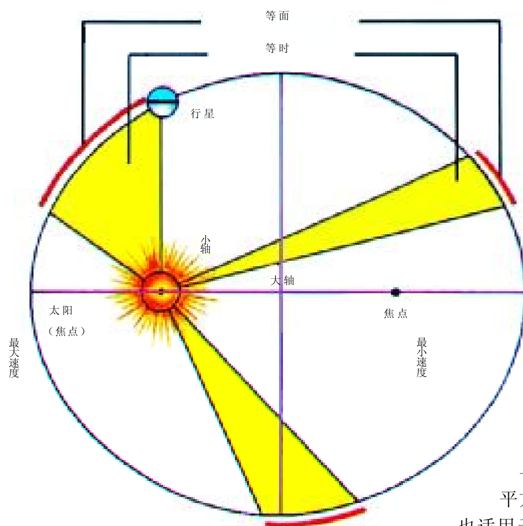


附：

引力的新认识

等效原理保证在任何一个时刻、任何一个空间位置上必定存在一个爱因斯坦的电梯，电梯中的一切现象就好像宇宙间没有引力一样。在这种电梯中，动者恒动，即惯性定律是成立的。按照定义，惯性定律成立的参考系是一个惯性参考系。这样，爱因斯坦电梯应是一个惯性参考系。

引力对一切物体产生的加速度相同，这是对处在同一个点上的物体来说的，在不同点上的引力加速度一般是不相同的。如图，在地球上不同地点的引力加速度是不相同的。因此，一个做自由落体运动的电梯，只能将一个点附近小范围内的引力作用（例如引力加速度）全



开普勒定律示意图

开普勒在17世纪初期发现的行星围绕太阳运动的规律有三条：第一，每个行星运转的轨道都是椭圆的，太阳位于椭圆的一个焦点上；第二，太阳中心与行星中心间的连线在轨道上所扫过的面积与时间成正比；第三，行星在轨道上运行一周的时间的平方与其至太阳的平均距离的立方成正比。开普勒的定律也适用于行星周围的卫星的运转。

生的，借助于纯理论方式（仅仅只凭计算），我们能够断定在这已知的自然过程中，相对于 K 做加速运动的参考物体 K_1 是如何去观察表现的。由于这个新的参考物体 K_1 存在有一个引力场，我们也必须考虑引力场是如何影响我们的研究过程的。

例如，我们知道，相对于 K（与伽利略定律相一致）做匀速直线运动的物体，相对于 K_1（箱子）不仅做加速运动，而且还作曲线运动。此种加速度或曲率相对于 K 存在的引力场对运动物体有所影响。引力场对物体运动的影响大家都已经知道，所以这一考虑并没为我们提供任何新的本质上的结果。

然而，如果我们对一道闪烁着的光线



开普勒　油画

开普勒是德国近代著名的天文学家、数学家、物理学家和哲学家。他以数学的和谐性探索宇宙，在天文学方面作出了巨大的贡献。开普勒是继哥白尼之后第一个站出来捍卫太阳中心说，并在天文学方面有突破性成就的人物，被后世的科学史家称为“天空立法者”。

部消除，而不可能在一个大范围中把引力的作用全部消除掉。因此，如果认为上述爱因斯坦电梯才是严格意义下的惯性参考系，那么这种参考系只能适用于局部的范围。

广义相对论的发展表明，真正严格的惯性系只能是一些局部惯性系（爱因斯坦电梯）。现在各个点上的局部惯性系之间是可以有相对加速度的。那么什么是引力呢，引力的作用就是各个局部惯性系之间的联系。在任何一个局部惯性系中，我们是看不到引力作用的。我们只能在这些局部惯性系的相互关系中。看到引力的作用。

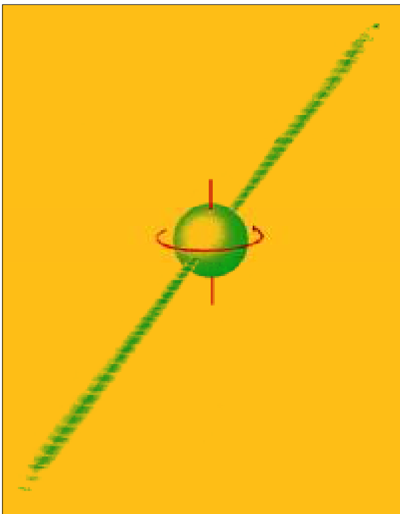
在物理学的其他部门中，我们的工作程序总是这样：取定一定的参考系用以度量有关的物理量，然后经过实验总结出其中的规律，发现基本方程。在这个过程中时空的几何性质（即所取的参考系）不受有关的物理过程影响。所以，这些问题中的基本方程只是物理量之间的一些关系，即：

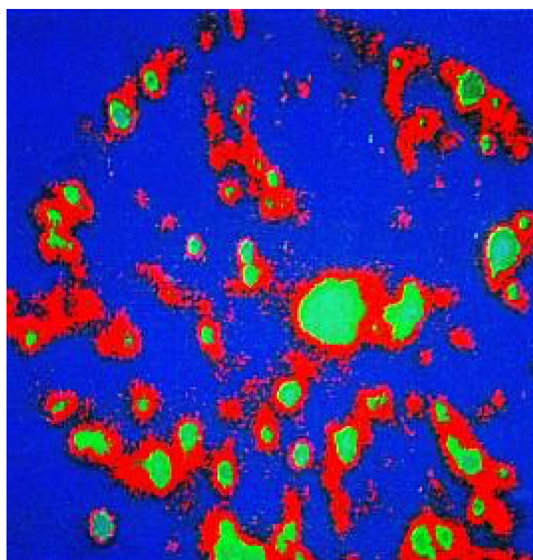
一些物理量 = 另一些物理量

但是，在引力问题中，引力一方面要

中子星　合成图片

中子星是处于演化后期的恒星，它也是在老年恒星的中心形成的。只不过能够形成中子星的恒星，其质量更大罢了。根据科学家的计算，当老年恒星的质量大于十个太阳的质量时，它就有可能最后变为一颗中子星，而质量小于十个太阳的恒星往往只能变化为一颗白矮星。

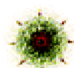




进行类似的考虑就得到一个新的、有基本重要性的结果。对于伽利略参考物体 K，这一道光线沿直线以速度 c 传播。很容易就能证明，光的路线不再是一条直线，我们相对于作加速运动的箱子（参考物体 K_1）来考察时可以明了这一点。从该事件中

中子星图　合成图片

中子星的密度为 10^{11} 千克/厘米^3，也就是每立方厘米的质量竟为一亿吨之巨！对比起中子星，白矮星的密度似乎不值一提。事实上，中子星的质量是如此之大，半径十公里的中子星的质量就与太阳的质量相当了。



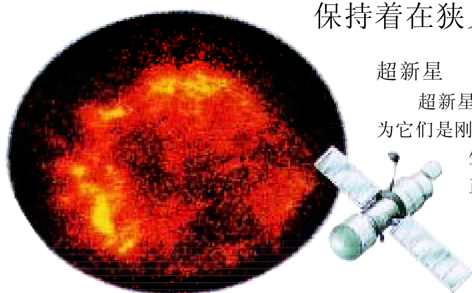
影响各种物体的运动，另一方面引力又要影响各局部惯性系之间的关系。所以，现在我们不可能先行规定时空的几何性质，时空的几何性质本身就是有待确定的东西。因此，在引力基本方程式中不可能没有时空的几何量。它应当反映出，引力本身及引力与其他物质之间的作用，即应有下列形式的方程：

时空几何量 = 物质的物理量

广义相对性原理

物理定律必须在任意坐标系中都具有相同的形式，即它们必须在任意坐标变换下是协变的。该原理又叫广义协变性原理。

爱因斯坦狭义相对论所考察的是将做匀速运动的参照系之间的相对性加以推广。不过，在真实的引力场和惯性力场之间并不存在严格的相消。比如，真实的引力场会引起潮汐现象，而惯性力场却并不导致这种效应。但是，在自由下落的升降机里，除开引力以外，一切自然定律都保持着在狭义相对论中的形式。事实上，这正是真

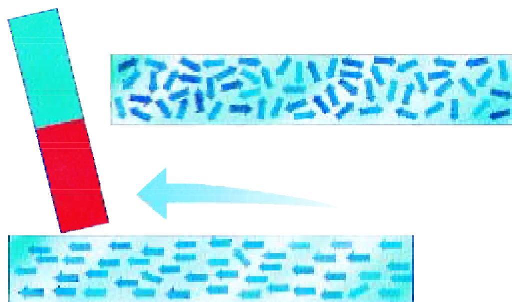


超新星　合成图片

超新星是变星中的一个类别。人们看见它们突然出现，曾经一度以为它们是刚刚诞生的恒星，所以取名叫“新星”。其实，它们不但不是新生的星体，相反，是正走向衰亡的老年恒星。其实，它们就是正在爆发的红巨星。当一颗恒星步入老年，它的中心会向内收缩，而外壳却朝外膨胀，形成一颗红巨星。红巨星是很不稳定的，总有一天它会猛烈地爆发，抛掉身上的外壳，露出藏在中心的白矮星或中子星来。

我们得出结论，引力场中的光线一般沿曲线[1]传播。这一结果在两个方面凸现出它的重要意义。

首先，它可以同实际相比较。虽然对这个问题，按照广义相对论的探究表明，光线穿过我们在实际运用当中能够加以利用的引力场时，其曲率[2]是极其微小的，但以掠入射方式经过太阳



磁化现象　示意图

磁体的性质和磁极间的相互作用决定了对周围的物体产生磁化现象。

[1] 曲线：在平面上或空间中按一定条件随时间（或另外的单个参数）而变动的动点的轨迹。例如，平面上一动点到一定点的距离保持不变的轨迹是圆，曲线按照它位于平面上或空间中分别称为“平面曲线”或“空间曲线”。

实引力场的重要本质。如果把自由下落的升降机称为局部惯性系，那么，等效原理就可以比较严格地叙述为：在真实引力场中的每一时空点，都存在着一类局部惯性系，除引力以外的自然定律和狭义相对论中的完全相同。

广义协变性对物理定律的内容并没有什么限制，只是对定律的数学表述提出了要求。爱因斯坦后来这样认为：广义协变性只有通过等效原理才能获得物理内容。

马赫原理

时间和空间的几何不能先验地给定，而应当由物质及其运动所决定。

这个思想直接导致用黎曼几何来描述存在引力场的时间和空间，并成为写下引力场方程的依据。爱因斯坦的这一思想是从物理学家E. 马赫对牛顿的绝对空间观念以及牛顿的整个体系的批判中吸取而来的。为了纪念这位奥地利学者，爱因斯坦

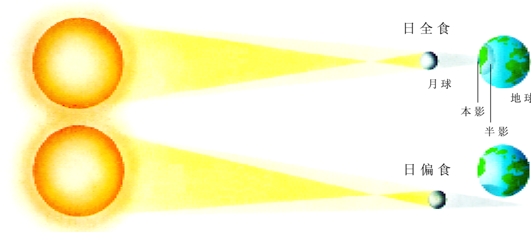


多伦多大学　摄影

多伦多大学始建于1827年，是北美大陆最古老的大学之一，也是世界最重要的研究性大学之一。它坐落于世界上最适合人类居住的城市——多伦多。该大学有3个校区，300类大学本科专业，32座图书馆。

日全食与日偏食　　合成图片

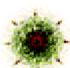
日食之时，月球会在地球表面投射一个小的黑影，即本影，日全食便会发生在此黑影所涵盖的区域内。在外围半影区域中的观测者只能看到日偏食。



的光线，其曲率的估计值达到1.7″。这应该以下述方式来证明：从地球上观察，某些恒星与太阳相隔并不遥远，因此它们在日全食时能够加以观测。当日全食时，这些恒星在天空中的视位置与当非日全食时太阳的视位置相比，应该偏离太阳。这一个极其重要的推断，

---

[2] 曲率：描述曲线弯曲程度的量。对于曲线上的一点 P，取它的两个邻近点 Q 和 R，过这3点作一个圆。当 Q、R 沿曲线接近于 P 时，如果这个圆有一个极限位置，则称这个极限圆为曲线在点 P 的“曲率圆”，它的中心称为“曲率中心”，半径称为“曲率半径”，曲率半径的倒数称为“曲率”，曲率愈大，表示曲线的弯曲程度愈大。



把他的这一思想称为马赫原理。

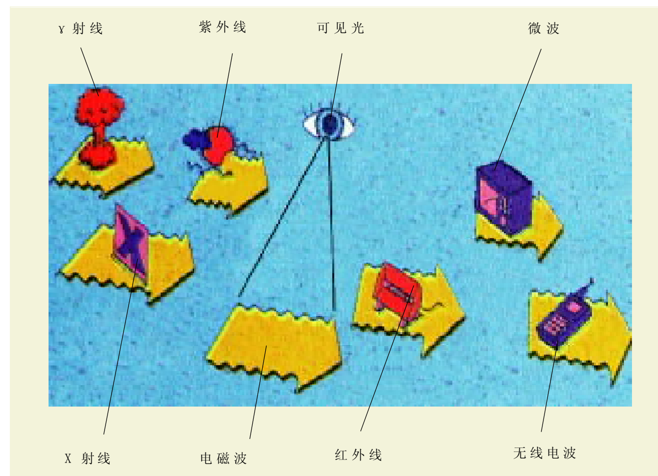
电动力学

电动力学是研究电磁现象的经典的动力学理论，它主要研究电磁场的基本属性、运动规律以及电磁场和带电物质的相互作用。

在电磁学发展的早期，人们认识到带电体之间以及磁极之间存在作用力，而作为描述这种作用力的一种手段而引入的“场”的概念，并未普遍地被人们接受为一种客观的存在。其实，电磁场是物质存在的一种形态，它可以和一切带电物质相互作用，产生出各种电磁现象。电磁场本身的运动服从波动的规律。这种以波动形式运动变化的电磁场称为电磁波。

电磁辐射　　合成图片

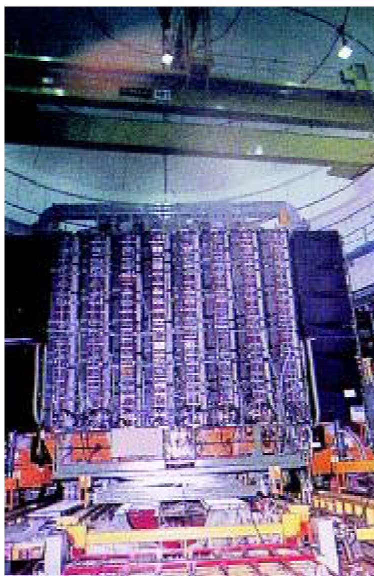
电磁辐射范围很广，包含着从γ射线到无限电波等，人的肉眼只能看到电磁辐射中的很少的可见光部分。



电动力学的任务，就是阐述电磁场及与物质相互作用的各个

它的正确与否，希望天文学家能够予以早日解决。

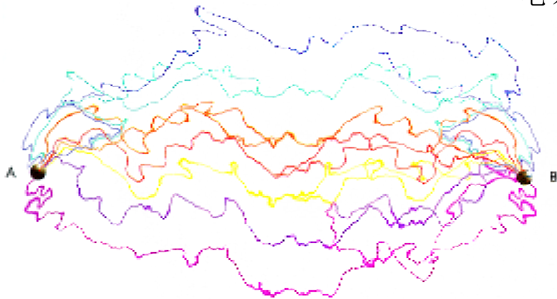
其次，我们的结果说明，依照广义相对论，作为狭义相对论中两个基本假定之一的真空中光速恒定定律的有效性不能被认为是无限的，只有光的传播速度因位置改变时才发生光线的弯曲。由于这种情况，我们或许会认为，包括狭义相对论在内的整个相对论，都要归于尘土，流于空谈。但事实并非如此，我们能做出的结论是：狭义相对论的有效性并非是无止境的，狭义相对论的结果只有在不考虑引力场对现象（例



电子机　合成图片

特殊范围内的实验定律，并在此基础上阐明电磁现象的本质和它的一般规律，以及运用这些规律定量地处理各种电磁问题、研究各种电磁过程。

电动力学中解释电磁现象的基本规律的理论，是19世纪伟大的物理学家麦克斯韦建立的方程组。麦克斯韦方程组是在库仑定律（适用于静电）、毕奥－萨伐尔定律和法拉第电磁感应定律等实验定律的基础上建立起来的。通过提取上述实验定律中带普遍性的因素，并根据电荷守恒定律引入位移电流，就可以导出麦克斯韦方程组。在物理上，麦克斯韦方程组其实就是电磁场的运动方程，它在电动力学中占有重要的地位。



历史求和理论　示意图

美国科学家查德·费因曼引入的所谓对历史求和的方法是一个对波粒二象性的很好的摹写。在这方法中，粒子不像在经典亦即非量子理论中那样，在时空中只有一个历史或一个轨道，而是从A 到B 粒子可走任何可能的轨道。

另一个基本的规律就是电荷守恒定律，它的内容是：一个封闭系统的总电荷不随时间改变。近代的实验表明，不仅在一般的物理过程、化学反应过程和原子核反应过程中电荷是守恒的，就是在基本粒子转化的过程中，电荷也是守恒的。

麦克斯韦方程组给出了电磁场运动变化的规律，包括电荷电流对电磁场的作用。对于电磁场对电荷电流的作用，则是由洛伦兹公式给出的。

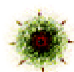

电子管　摄影

电子管是一种在气密性封闭容器（一般为玻璃管）中产生电流传导，以获得信号放大或振荡的电子器件。早期应用于电视机、收音机、扩音机等电子产品中，近年来逐渐被晶体管和集成电路所取代，但目前在一些高保真音响器材中，仍然使用电子管作为音频功率放大器件。

如光）的影响时才能成立。

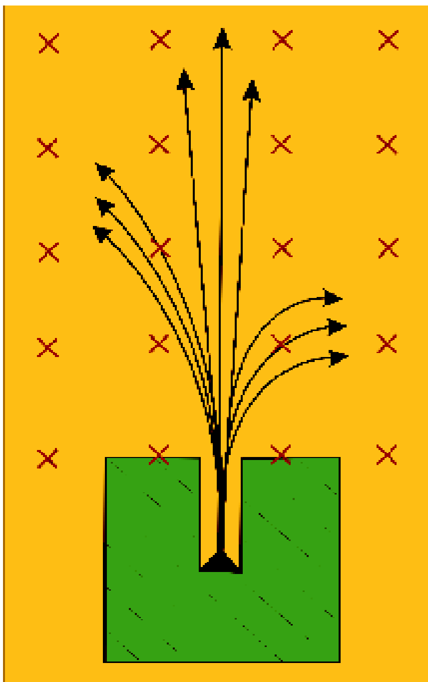
由于对相对论持相反意见的人常说狭义相对论颠覆了广义相对论，因此用一个比较恰当的例子来把这个问题的实质弄得清楚明晰是十分明智的。在电气力学发展以前，静电学[3]定律被看做是电学定律。现在我们知道，如果要从静电学出发，正确地推导出电场，那么电质量只有在处于相互状态并与坐标系完全保

[3] 静电学：研究“静止电荷”的特征及规律的一门学科，是电学的领域之一。静电是指静电荷，是称呼电荷在静止时的状态，而静止电荷所建立的电场称为静电场，是指不随时间变化的电场。该静电场对于场中的电荷有作用力。



电离层　示意图

所谓电离层是因高空的气体分子与原子被阳光的紫外线分解，形成如云状般的电子分层。电离层在白天时自底而上分成D、E、F 层。在夜晚时D 层会消失，E 层的密度会降低。F 层在白天时分成F_1和F_2，夜晚时F_1与F_2合并成一层。

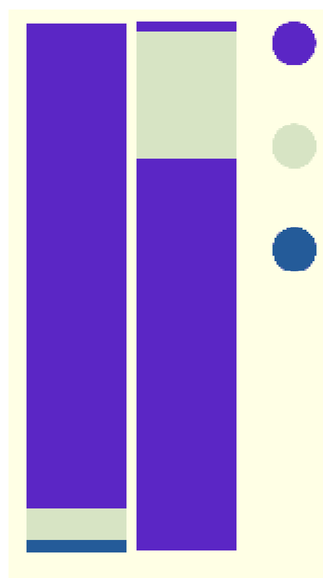


将麦克斯韦方程组、洛伦兹的公式和带电体的力学运动方程联立起来，就可以完全确定电磁场和带电体的运动变化。因此，麦克斯韦方程组和洛伦兹公式构成了描述电磁场运动和电磁作用普遍规律的完整体系。

在电磁场的作用下，静止的媒质中一般可能发生三种过程：极化、磁化和传导。这些过程都会使媒质中出现宏观电流。极化和磁化的公式的另一个重要限制是不能应用于铁电和铁磁情况。铁磁质是常用的磁性媒质之一。另外，在强场情况，即使普通的媒质，也会出现非线性现象。当电场超过一定限值时，电介质甚至会被击穿。电磁波在各向异性介质中传播时，常会发生一些复杂的现象，如双折射等。

在电动力学中，处理有媒质的电磁问题时，需要将麦克斯韦方程组和媒质的本构方程联立起来求解。对上面

持静止状态的情况下才能证明，而这在严格的情况下是永远不会实现的。难道由于这个理由，静电学被电气力学的麦克斯韦方程推翻了吗？一点也不。作为一个有限制性的定律，电气力学定律直接得出静电学定律是在“场”不随时间改变这一情况下。这是一个任何物理理论都没获得的更好的命运了，一个理论本身指出创立了一个更为全面的理论，在这更为全面的理论中，原来的理论作为一个受限制的理论继续存在下去。



磁场影响　合成图片

在磁体周围有一个人眼看不见的磁场。在磁场内磁体有一种磁力。用铁屑我们能够发现这种磁场是什么样子的。当铁屑在磁场中时，它们就围绕着磁体形成一个磁场的图形。图中的圆点是铁屑在磁铁的作用下形成的。

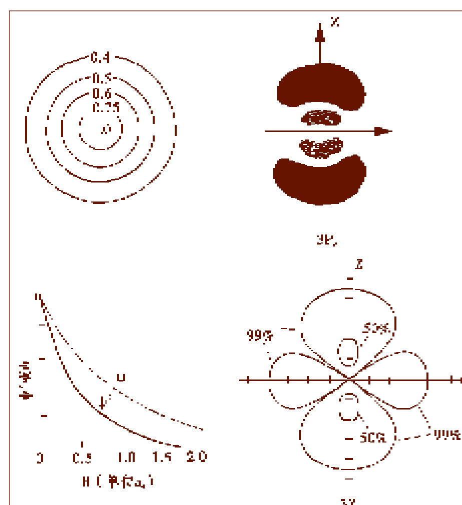
提到的那些特殊情况，根据其本构方程作特殊研究，其中有的方面甚至发展成为电动力学的专门分支。

静电学

古希腊是西方电磁学的发源地。在古希腊的文献中记载了一些电磁现象。柏拉图（前427～前347年）曾提到“关于琥珀和磁石的吸引是观察到的奇事”。

吉尔伯特最先系统研究电磁现象

吉尔伯特（1544～1603年），英国女王伊丽莎白一世的御医。他是第一批通过实验对电现象和磁现象进行系统研究的人。他首先确定琥珀的吸引和磁石的吸引是两种不同的现象。磁石本身就具有吸引力，而琥珀则要经过摩擦；磁石只能吸引有磁性的物体，而摩擦过的琥珀则能



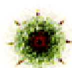
电子云　示意图

电子云是一种形象化的比喻，电子在原子核外空间的某区域内出现，好像带负电荷的云笼罩在原子核的周围，人们形象地称它为“电子云”。电子是一种微观粒子，在原子如此小的空间（直径约10^{-10}米）内做高速运动，核外电子的运动与宏观物体运动不同，没有确定的方向和轨迹，只能用电子云描述它在原子核外空间某处出现机会的大小。



通过对光的传播事例的讨论，我们看到，广义相对论能够从理论上演绎出引力场对已知自然过程这一进程的影响，而广义相对论提供的最令人瞩目的是关于对引力场本身所满足的定律的研究，这是解决这一问题的钥匙。让我们对此考虑考虑。

我们熟悉了空间—时间这一经过适当选取参考物体后表现为（近似地）“伽利略”形式的没有引力场的区域，如果相对于一个作任何运动的参考物体 K_1 来考察的话，那么相对于 K_1 存在有一个对于空间和时间是可变的引力场，这个场的特性取决于 K_1 所选定的运动。广义相对论认为：按照普遍的引力场定律产生的所有引



电磁起重机　摄影

电磁场是有内在联系、相互依存的电场和磁场的统一体的总称。随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场，两者互为因果，形成电磁场。人们利用它发明了电磁起重机，以此为社会生活服务。

吸引任何小物体。吉尔伯特把经过摩擦后能吸引小物体的物体叫做electric，意思是“琥珀体”，这就是西文中“电”的词根的来源。

奥托·格里克发明摩擦起电机

奥托·格里克（1602～1686年），一个多才多艺的工程师，当过35年德国马德堡市市长。1654年，他利用自己发明的抽气机做过著名的马德堡半球实验。1660年，他发明了第一台可产生大量电荷的摩擦起电机，为进一步研究电创造了条件。后来牛顿对摩擦起电机作了改进，用玻璃球代替硫磺球，制成摩擦起电机。以后又有人不断改进。

电的传导

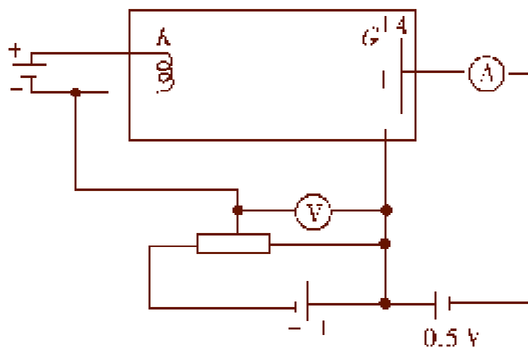
斯蒂芬·格雷（1666～1736年），生于英国一个手工艺家庭。他发现了电的传导现象，确定了



富兰克林的雷电实验　油画

富兰克林发现放电现象与天空中的闪电极为相似。当雷电发生的时候，正电荷区和负电荷区之间的电场大到一定程度，两种电荷就要发生中和并放出火花，这种现象叫火花放电。火花放电时不但发生强烈的闪光，还发出巨大的响声。富兰克林猜想，这强烈的光就是闪电，响声就是雷鸣。

力场都必须被满足。当然，并不是所有的引力场都是如此产生的，但我们仍然对普遍的引力定律能从一些特殊的引力场推导出来抱有希望。虽然我们的希望已经以极其完美的方式实现，但从认清到完全实现，是经过重重探索及克服许多困难之后才达到的。我不敢对读者避而不谈这个问题的深刻意义，反之，我们需要进一步阐述空间—时间连续区的观念。



弗兰克—赫兹实验　示意图

为了研究原子内部的能量时态问题，弗兰克和赫兹使用简单而有效的方法，用低速电子去轰击原子，观察它们之间的相互作用和能量传递过程，从而证明了原子内部量子化能级的存在。

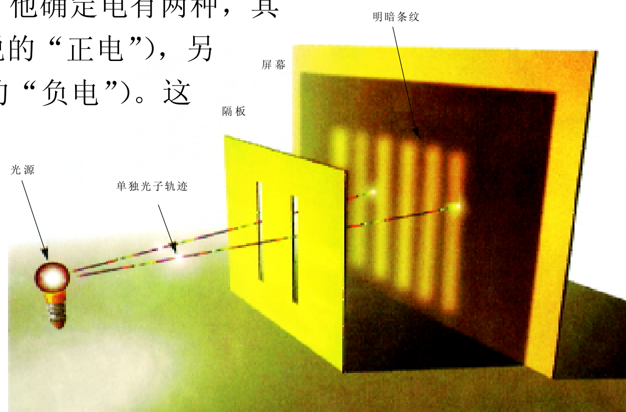
有的物体是导电体，有的物体是非导电体。他把电容易通过的物体（如金属）叫做导电体，而把电难以通过的物体（如丝线）叫非导电体。格雷还做过一个有趣的实验：把一个小孩用几根粗丝绳水平吊起来，用摩擦过的带电玻璃管接触小孩的胳臂，孩子的手和身体便能吸引羽毛和铜屑。这表明，人体也是导电体。

电有两种

杜菲（1698～1739 年），法国科学家。他先研究摩擦起电和电的传导，然后是电的排斥现象。他确定电有两种，其一为玻璃电（就是现在所说的“正电”），另一为树脂电（即现在所说的“负电”）。这两种电的特点是，它们自己互相排斥，彼此互相吸引。

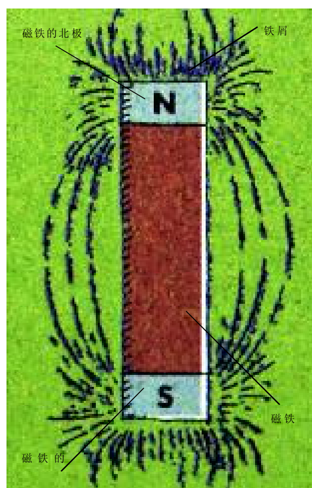
莱顿瓶

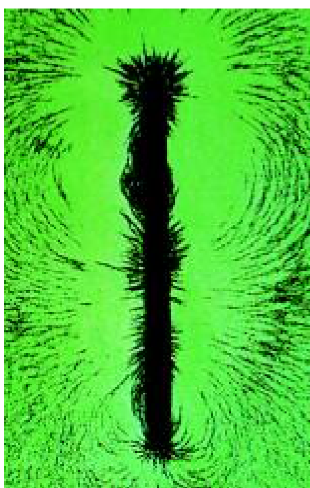
穆欣布罗克（1692～1761 年），荷兰物理学家。他在从事电学实验时发现，如果把带电体放在玻璃瓶中，可以把电保存起来。后来人们把这个蓄电的瓶子叫做



双缝实验　合成图片

由于量子力学引进的二重性，粒子也会产生干涉。一个著名的例子就是所谓的双缝实验。双缝产生明暗条纹，其原因是从双缝来的波在屏幕的不同部分相互叠加或相互抵消。利用粒子，比如电子，得到类似的条纹，证明它们的行为和波相似。





磁铁的两极　合成图片

我们把铁屑喷洒在磁铁附近，就可以看到解释磁场的“力线”。铁屑被磁铁的北极和南极吸引，在两极（即力线）之间呈曲线形排列。

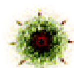
“莱顿瓶”。莱顿瓶几经改进后，瓶内外表面都贴上金属箔，瓶盖上插一金属杆，杆上端装一金属小球，下端用金属链子与瓶内表面接触，瓶内盛水，增大了瓶的蓄电能力，可以产生更强的电击。莱顿瓶的出现为进一步研究电现象提供了有力的手段。

富兰克林的雷电实验

富兰克林（1706～1790年），美国物理学家。他根据自己所观察到的现象，认为闪电和电火花是同一种东西，猜想闪电是带电的云大量放电产生的。他用丝手帕做了个风筝，风筝上安装一根尖铁丝，用来引云中的电。铁丝与放风筝的麻线连接在一起，麻线的下端系一段丝带和一把金属钥匙，钥匙作为导体，以备引出电来。放风筝时手握丝带，以防电对身体的伤害。1752年7月的一天，电闪雷鸣。46岁的富兰克林带着21岁的儿子来到牧场，把风筝放到天上有闪电的云层。他们观察到麻线上的小纤维都竖立起来，跟摩擦产生的电效果一样。他用手指靠近钥匙，立即有电火花从手指上闪过。他使莱顿瓶充电，再放电，产生的效果都跟摩擦电完全相同。这就是著名的富兰克林费城风筝实验。它清楚地证明了雷电就是一种放电现象，使人类对电的认识前进了一大步。后来富兰克林在此基础上发明了避雷针。

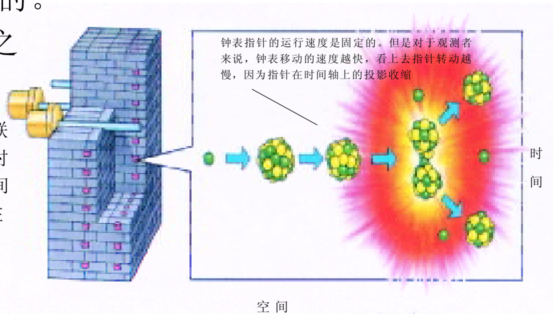
平方反比定律

库仑（1736～1806年），法国工程师和科学家。1785年开始研究电学。用他发明的扭秤研究带电体间的相互作用，建立了库仑定律。库仑制作的扭秤十分精细灵敏，使得他有可能直接测量不同距离下电荷之间微弱的静电力，并且确立了平方反比定律。库仑定律的发现，使电学进入了定量科学阶段，为静电学奠定了基础。1881年第一届国际电学大会决定用“库仑”作为电荷量单位。



2.6 在旋转的参考物体上钟和量杆的行为

迄今为止，由于我故意不谈空间和时间数据的物理解释，其结果是我在广义相对论的论述中犯了一些懒散的毛病，而这种毛病在狭义相对论中绝不是不重要和可以原谅的。现在是疗救的时候了，但开始之



时间和空间　合成图片

在爱因斯坦的相对论中，时间和空间之间发生联系所产生的最重要的结果是，物体运动速度越快，时间好像流逝得越慢。此图表明了运动着的钟表与空间（横坐标）和时间（纵坐标）之间的关系。钟表在空间中的运行速度越快，发生的偏转就越大，因为它要在较短的时间内运行较长的空间距离。这对钟表指针的转动速度没有影响。

附：

乱弹：相对论中没有绝对时间

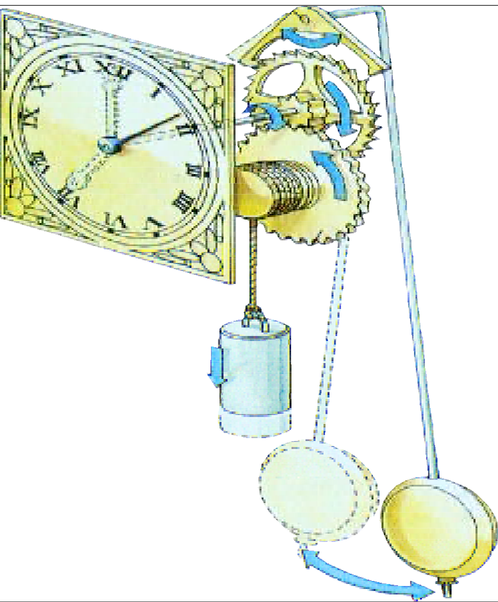
相对论认为，时间是相对的，空间是相对的。霍金教授《时间简史》的第六章也强调，相对论中没有绝对时间，这无疑充分说明霍金教授对相对论的赞同度为百分之百。

然而，究竟什么是时间，不仅相对论不曾明确，霍金的所有理论也未能说明。事实上，整个物理学从古到今都不曾对时间进行准确定义。然而，时间概念却是整个物理学基础的基础，这是常识。

尽管物理学不曾准确定义时间，但是，这并没有妨碍物理学应用时间。物理学关于时间的最典型的例子，就是爱因斯坦用两

摆钟　合成图片

惠更斯在研究摆钟的过程中发现，单摆的运动不严格等时。他认为，只有在摆角比较小的情况下，单摆的等时性才成立；当摆比较大的情况下，单摆的运动不严格等时，比如当摆角为60°时，不严格等时性很明显。为了补偿单摆的不严格等时，惠更斯从证明摆线的几何性质开始，进而研究其在机械上的应用，利用摆线理论设计出了严格等时的摆钟结构。



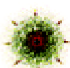


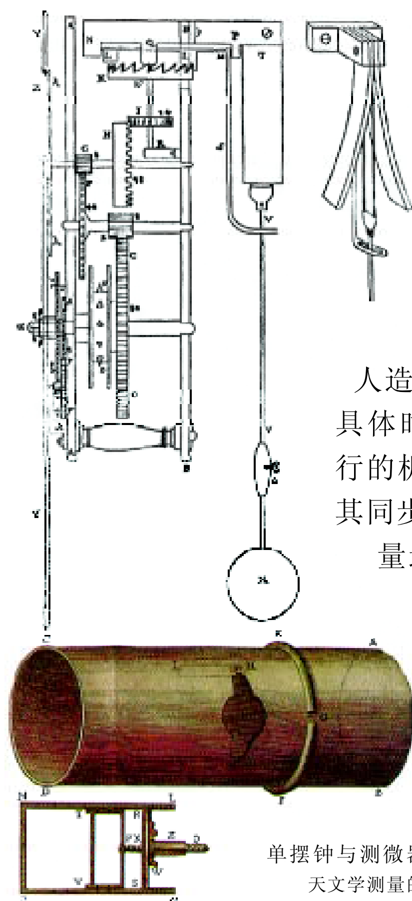
引力场效应　合成图片

一个收缩的恒星增长的引力场对周围效应可以将空间想象成为溅落的水珠。物质越重，凹入处越深。

前，我要声明一点，这个问题将考验读者的忍耐力和抽象能力。

让我们还是回到以前经常引用的十分特殊的情况中来。在考虑一个相对于参考物体 K（其运动状态已适当选定）不存在引力场的空间—时间区域时，对这个区域而言，K 就是一个伽利略参考物体，而且狭义相对论的结果对于 K 是成立的。我们假定以另一参考物体 K_1 来考察这个区域，并设 K_1 相对于 K 做匀速





个相同的钟来测量不同地点的同时性。这个事例告诉人们，尽管物理学没有定义时间，但是，时间是绝对可以通过钟表来测量的。可是，钟表测量的时间究竟是一个怎样的“时间”概念呢？智慧人类的物理学至今都没有迈过这个不是坎的“坎”。

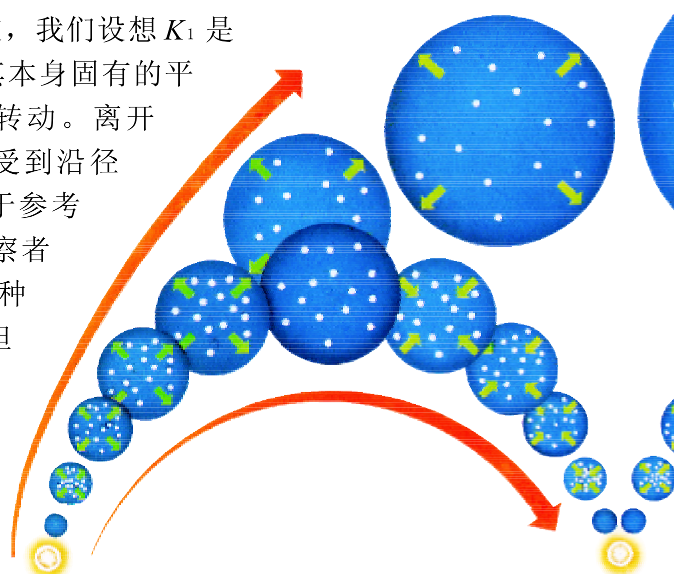
事实上，钟表自诞生以来就是一种人造工具，是一种用于测量或记录地球每天的具体时间的工具，是一个独立于地球且能够运行的机械系统，并与地球每日的自转周期同步。其同步性越高，则精度也越高。既然钟表可以测量地球时间，那么，时间则是具有一个可以彻底认识与揭示的客观规律。

最狭义的时间概念，就是地球这个主体在太阳系中自转一圈的快慢程度，“时、分、秒”就是对其每日自转的快慢程度的细化性描述。

单摆钟与测微器　合成图片

天文学测量的逐渐精确，是由于两项伟大发明的问世。这两项发明一项是惠更斯的单摆钟（上图为它的结构图），另一项是奥祖的测微器（下图）。

转动。为了使观念确定，我们设想 K_1 是一个平面圆盘，它在其本身固有的平面内围绕圆心做匀速转动。离开盘心的一个观察者感受到沿径向外作用的力，相对于参考物体 K 保持静止的观察者就会认为这个力是一种惯性效应离心力[1]。但



宇宙　合成图片

霍金说，宇宙在开端处没有边界，所以宇宙是一个自足的整体。他还论断道，上帝实在没有必要去启动宇宙：宇宙能够自身存在那里，不需要上帝去创造它。

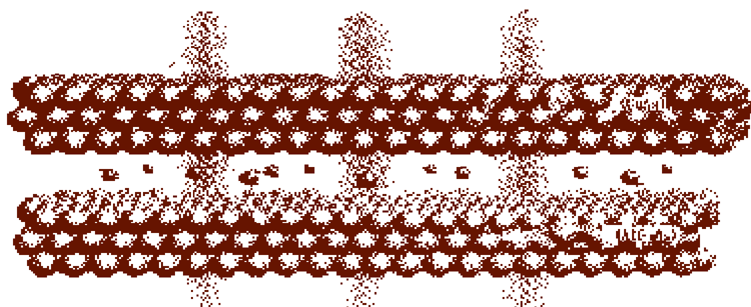
站在宇宙空间天文学的广义角度来分析，时间的本质意义，是天体（物体）在宇宙空间的准确位置和运动的过程。因此，时间必然是绝对的。时间必然有其“主体、空间位置、运动”三大特性。地球上所承载的万事万物，必然是地球时间。

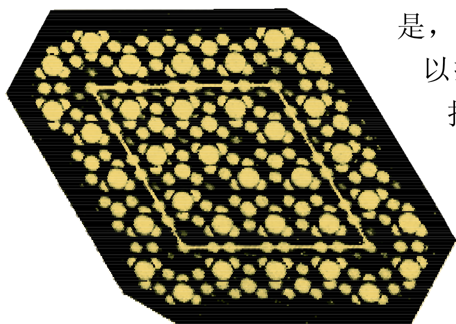
站在宇宙太空的角度，所有星系（天体）的运动是确切的、整体化的，因此，天体间的时间具有可以比较的特性，和以及互相换算的特性。宇宙的时间是可视的、一体化的。

时间是从宏观到微观、从纵向到横向的一体化并列之物。我们可以找到一个共同的焦点来进行相互换算。其中，天文学中以光年为计时测距单位，是地球时间之计时单位的换算方法。因为，光速中的时间单位是地球时间的“秒”，尽管以光速运行一年（地球年）作为基本度量单位，其形式也只是地球时间放大后的形

量子流体　合成图片

电子量子流体现象的发现是量子物理学领域内的重大突破，它对物理学许多分支产生了影响，为现代物理学许多分支中断的理论的发展作出了重要贡献。他们的这些研究将可应用于研制功能更强大的计算机和更先进的通信设备，为电子产品的微型化的研究带来突破；他们的发现为许多人体现象的研究开辟了一条新路。很多国家的研究人员都在进行这一领域的研究，以期获得新的发现。



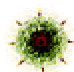


是，根据广义相对性原理，圆盘上的观察者可以把圆盘当做一个“静止”的参考物体。他把对他起作用的，而且实际上对所有相对于圆盘保持静止的物体的力看做是引力

硅原子　合成图片

硅原子大于碳原子，因此，硅原子与硅原子的结合物不如碳原子与碳原子的结合物稳定。硅原子的长链和环存在的可能性远远小于碳原子的长链和环。

[1] 离心力：以匀速转动系统为参考系时附加于系统内物体的惯性力，又称惯性离心力。设此旋转系统的角速度为 ω，静止在这系统内的物体，如其质量为 m，离转轴的距离为 r，则从惯性系来看，客观存在一个其值为 $mr\omega^2$ 的向心力迫使该物体转动。而从随之转动的非惯性系来看，该物体保持静止，要附加一个和向心力大小相等、方向相反的力，以维持表观的平衡。此力即惯性离心力。如果物体在此非惯性系内以 v 运动，则还受到和 v、ω 有关的另一种惯性力支配，即科里奥利力。



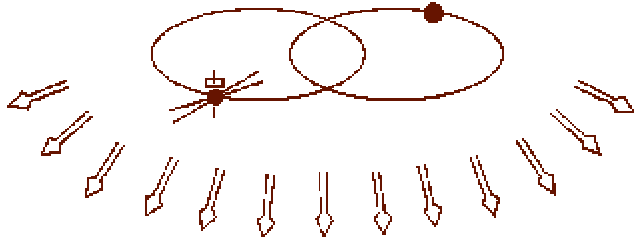
式。

时间是天体的运动特性。运动的系统与系统之间的时间具有可比较的特性。时间的并列关系，即是这种可比较性的本质。天体系统彼此之间的时间及并列特性，是指系统与系统的同时存在、同时运动规律，这种同时性是绝对的。站在宇宙的角度去看，并列，意味着同时存在，同时发生各自的运动。

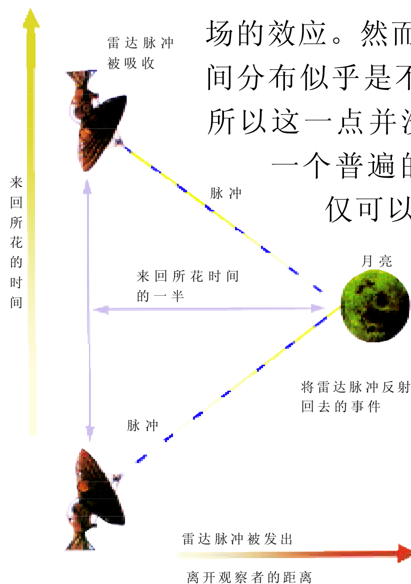
爱因斯坦的狭义相对论建立在两条假设基础之上：一是相对性原理，即惯性系上的一切物理定理都具有同样的表达方式；二是光速不变原理，即光速具有最高并恒定的速度（30 万千米每秒），与发光体是否运动无关。然而，一方面，假如地球上的一切物理定理恰恰正好不是在一个惯性系上总结，那么，建立相对论的第一条基本假设前提则不能成立。事实上，地球不仅有公转，更有自转，它不是一个保持匀速直线运动的惯性系。另一

脉冲星引力波　示意图

1974 年美国人泰勒领导的实验小组，用射电望远镜对天空扫描，发现了离地球15　000 光年的一颗脉冲星发出的脉冲信号，又经过近四年的观测，间接证实了引力波的存在。脉冲星是急速旋转的中子星，它是一个内部停止了核燃烧而被压得极端紧密的恒星体。它与另一个中子星一起相互绕转，构成一个双星体系。按照爱因斯坦的理论，这个双星体系应能发射引力波，从而带走一些能量，使双星轨道慢慢缩小，周期慢慢变短。这些变化尽管都很微小，却可以从它们发出的脉冲信号到达地球的时间精确计算出来。



场的效应。然而，按照牛顿万有引力理论，这个引力场的空间分布似乎是不可能的。但是由于观察者相信广义相对论，所以这一点并没妨碍他的思考。他有相当正确的理由相信一个普遍的引力定律能够建立起来——该引力定律不仅可以正确地解释众星的运动，而且可以正确地解释观察者所体验到的力场。



这个观察者为了得出确切的定义来表达相对于圆盘 K_1 的时间数据和空间数据的含义，于是便在圆盘上用时钟和量杆做实

时间和空间坐标　合成图片

在经典物理学中，时间坐标和空间坐标之间划出了一条鲜明的界线，时间坐标总是在其本身中变换，这是因为经典力学中时间间隔被看成是不变的、绝对的。洛伦兹变换表明时间坐标和空间坐标总是合在一起变换的，因此在狭义相对论中，时间和空间不再是绝对的和彼此独立的东西，而是紧密联系在一起而不可分割了。

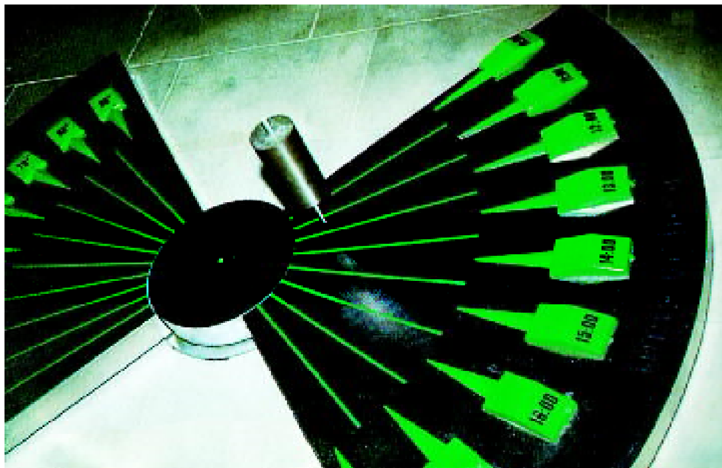
方面，相对论的结论里，时间是相对的，空间是相对的，可是这显然与建立狭义相对论的第二个前提条件“光速不变原理”相矛盾。因为，如果没有光速不变，则不能推导相对论及结论。既然相对论的结论是“时间是相对的”，则显然与建立它的前提条件之一的光速不变原理中的绝对的时间和空间相矛盾。即如果时间和空间不是绝对的，那么光速不变原理则无法说起。可见，狭义相对论无疑存在着显然的谬误。

现在的问题是，关于时间课题，霍金教授在《时间简史》中，一是以石头击水所扬起的波纹之特性，提出时间锥理论（时间概念），二是提出了虚时间的概念。

然而，这个问题值得商榷：一方面时间是可以用钟表来测量的，可是时间锥

傅科摆　摄影

傅科摆是指可自由朝任一方向摆动的单摆。这种摆一旦朝某一方向摆动，除非受外来的力干扰，否则会一直来回摆动。傅科摆设计的目的在于证明地球自转的现象。这种摆前后摆动的路线都在同一平面上，但是由于地球的自转使得摆几小时内就会逐渐改变它的摆动路线。



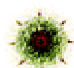


惠更斯摆钟模型　摄影

惠更斯在天文研究中深感精确计时的重要性，因此潜心研究计时器，制造出第一台有实用价值的摆钟。其准确度达到每天误差在5分钟以内。图为惠更斯制造于1673年的摆钟的模型。

验。这些定义的基础源于他的观察，他又是怎样做的呢？

首先他将两个同一构造且相对于圆盘保持静止的时钟放在圆心及圆盘的边缘，我们现在来自问自答，从非旋转性的伽利略参考物体K的立场来看，这两个时钟的快慢是否是相一致的呢？我们从参考物体去判断，圆盘中心的时钟并没有速度，而由于圆盘的转动，相对于K的圆盘边缘的时钟是运动的。从本章第十二节的结果可以得知，圆盘边缘的时钟永远比圆盘中心的时钟走得慢，也就是从参考物体K去观察，情况就会如此。显然，在圆盘中心的观察者也会得到同样的效应。因此，在圆盘上，或者说在





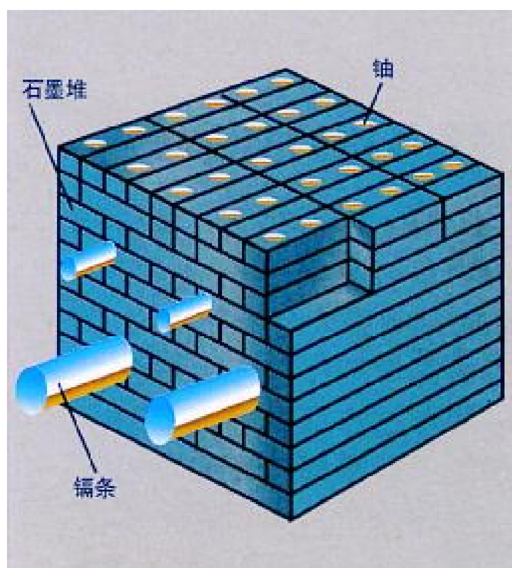
无法用钟表来测量，因此时间锥与时间的真实的本质大相径庭；另一方面，霍金教授自己也不能详细与准确地描述“虚时间”，而是在关于“《简史》之简史”一文中这样公开地回避他自己提出来的“虚时间”概念：“虚时间，它对于赋予历史的求和以数学意义不可或缺。现在回想起来，当初我应多花些工夫去解释这个非常困难的概念。虚时间似乎是人们在阅读时遭到的最大障碍。其实，实在没有必要准确理解何为虚时间——



美国国家科学院　摄影

美国科学界荣誉性及政府咨询机构。1863年3月3日根据林肯总统签署的国会法令建立。它不是政府部门，而是民间的、非营利的、科学家的荣誉性自治组织，其下不设研究机构。以国家研究委员会为执行机构，其工作程序通常是由美国国会专门委员会授权或由联邦政府部门提出，由国家研究委员会的管理委员会确定其所承担的关于当代科技问题的研究项目，并组织国家科学院及国家工程院、医学研究院和全国其他专家组成专门委员会、小组进行研究并作出答复。

每一个引力场中，时钟走得快慢与否，要看时钟（静止）所放的位置。正是由于如此，合理的时间定义不可能通过借助相对于参考物体静止地放置的时钟来得出，想要在这样的例子中引用最初的同时性定义有同样的困难，



反应堆　合成图片

核反应堆，又称为原子反应堆或反应堆，是装配了核燃料以实现大规模可控制裂变链式反应的装置。根据用途，核反应堆可以分为以下几种类型：①将中子束用于实验或利用中子束的核反应堆。②生产放射性同位素的核反应堆。③生产核裂变物质的核反应堆，称为生产堆。④提供取暖、海水淡化、化工等用的热量的核反应堆。⑤为发电而发生热量的核反应堆。⑥用于推进船舶、飞机、火箭等的核反应堆。

只要认为它和我们称之为实时间的不同即可。”这就是霍金的虚时间，一个连霍金自己也并不清楚的糊里糊涂的物理概念。

关于什么是时间，霍金、爱因斯坦以及整个物理学，都不能给予一个准确的认识、理解、定义，仅仅只是盲目地应用时间，以钟表来测量时间，研究时间，描述时间，但最终却总是自觉或不自觉地远离了时间的本质。

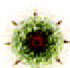
光纤　合成图片

光纤是以光脉冲的形式来传输信号，以玻璃或有机玻璃等为网络传输介质。它由纤维芯、包层和保护套组成。　光纤可分为单模(Single Mode)光纤和多模(Multiple Mode)光纤。



时间是天体及其物体的自然属性，不以人的意志为转移，是一种实实在在的运动形式，必然不可能为虚。由于天体的运动是不可逆的，因此，时间也不可能为负，仅仅有过去、现在、将来而已。提出负时间或虚时间之观念与理论者，无论他是科学理论界多么权威的人士，也不能改变时间的自然属性。显然，“虚时间”是霍金在物理学上引入的一个谬误性概念或理论。





马萨诸塞大学　摄影

美国一所国家知名的研究机构，坐落在美丽富饶的新英格兰镇，四周环绕小山、森林、湖泊以及草地，离波士顿和纽约城只有几个小时路程。该公立大学由马萨诸塞州协助，提供付费的优秀教育。它提供范围广泛而丰富多样的学术及课外活动。

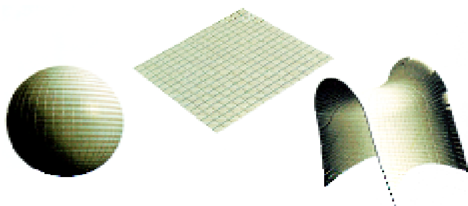
但我对这一问题不想再进行更深层次的讨论。

此外，空间坐标的定义在这个阶段也出现难以克服的困难，如果观察者采用他的标准量杆（一根与圆盘半径相比很短的杆）放在圆盘边缘，根据伽利略坐标系来判断，这根杆的长度将小于1，因为在本章第十二节中，运动的物体发生收缩是在运动的方向。另一方面，如果把标准量杆沿圆盘半径置放，从参考物体K判断，量杆会缩短。如果观察者用量杆先测量圆盘的圆周，然后测量圆盘的直径，两者相除后，所得到的商并非是大家熟知的π =3.14……，而是一个更大的数。对于相对于K保持静止的圆盘，π值则会准确地得出。这说明在转动的圆盘，或者说在一个引力场中，欧几里得几何学的命题并非都是能严格成立的。如果把量杆在一切位置和每一取向的长度都算作1的话，那么直线的概念也就无任何意义。所以我们在讨论狭义相对论时所使用的方法，不能被相对于圆盘严格地作坐标x、y、z的定义所借鉴。在这一事件中，只要时间和坐标的定义没有详细给出，我们就不能指出在任何自然定律中出现的事件的严格的意义。

因而所有我们以前立足于广义相对论得出的结论似乎也就有了问题，在实际中我们必须制造一个巧妙的便捷之道才能严格地应用广义相对论公设。我在下列章节将帮助读者对此作好准备。

2.7 欧几里得和非欧几里得连续区域

一张表面是大理石的巨大桌面在我面前展开，我可以在这个桌面从一点到达任何其他一点，即连续从一点指向“邻近的”另一点，并可反复这个过程若干（任意）次。换句话说，点对点的运动无须从一点“跳



宇宙的历史　合成图片

物理学定律规定一个初始状态如何随时间演化。例如，如果我们向空中抛出一块石头，引力定律将准备规定石头后续的运动。宇宙学企图利用这些物理定律来描绘整个宇宙的变化。如果宇宙的历史像一张马鞍面那样向无穷远伸展，人们就遇到了在无穷远处如何指定边界条件的问题。而如果宇宙在虚时间里的所有历史是像地球表面那样的闭合面，人们就根本没有指定边界的条件。

附：

欧几里得几何学

欧几里得几何学简称欧氏几何。它是相对非欧几里得几何学而言，以欧几里得平行公理为基础的几何学。由古希腊数学家欧几里得创始。在此之前，古希腊学者泰勒斯已开始了命题的证明；毕达哥拉斯学派已发现了勾股定理、不可通约量，并知道了五种正多面体的存在；雅典的智人学派提出三等分任意角、倍立方和化圆为方几何作图三大问题；安提丰和欧多克索斯提出改进了穷竭法；埃利亚学派的芝诺提出有关无穷的四个悖论；原子论学派的德谟克利特用原子法得出锥体的

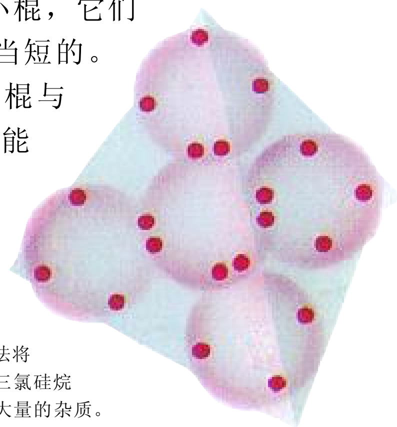


欧几里得　素描

欧几里得的重大功绩是编写了《几何原本》。从来没有一本教科书，像《几何原本》这样长期占据着几何学教科书的头把交椅。从1482年出现活字印刷以来，《几何原本》竟然印刷了1 000版以上。而在此之前，它的手抄本统御几何学达1 800年之久。欧几里得的影响是如此深远，以至于欧几里得和几何学变成了同义语。

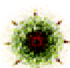
跃”到另一点。我想读者一定能清楚明白所说的“邻近的”和“跳跃”的意思（如果他不过于书生气的话）。我们明确地把这一明显的性质来描述桌面的一个连续区。

我们既然已经设想了许多长度相等的小棍，它们的长度同表面为大理石板的桌面相比是相当短的。这儿的长度相等，指的是把其中的一个小棍与另一个小棍彼此垂直，它们的上下两端都能重合。其次，我们取四根小棍在桌面上构成一个对角线长度相等的四边形（正方



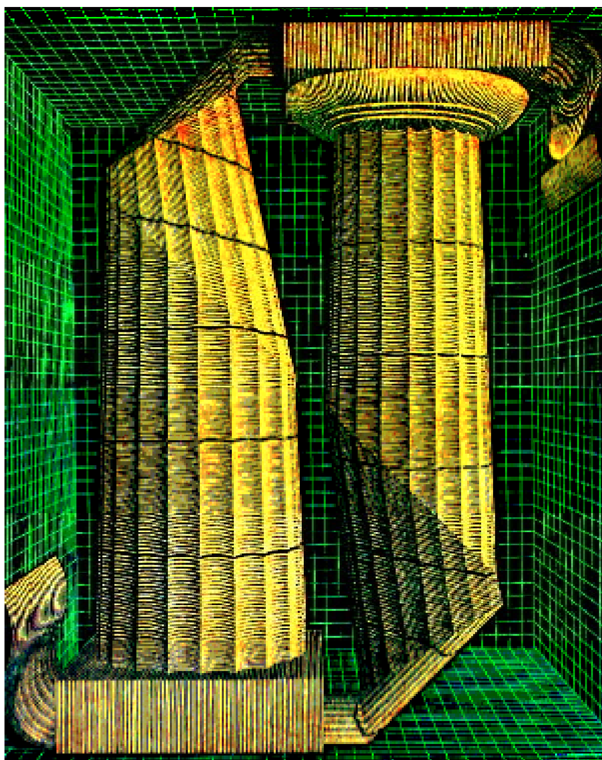
硅晶体　合成图片

近些年来，将成品转化为硅的混合制品是目前提取纯硅最理想的做法，比如用三氯硅烷，通过各类反应，将其重新转化为硅。做法将从起初经过初步提炼的硅中，提炼出棒状的纯净的硅晶体。它经过三氯硅烷蒸气在高温中的反应，将更多的纯净的硅结留在了棒上，而去除了大量的杂质。



体积公式等。加之柏拉图学派提倡智力训练和逻辑思维的培养，欧多克索斯用公理法创立比例论，亚里士多德形式逻辑的奠基，使几何公理化水到渠成。约公元前300年，亚历山大学派的创始人欧几里得按照逻辑系统把几何命题整理起来，用公理法建立起演绎体系，完成巨著《几何原本》，使几何成为一门独立的、演绎的科学。

《几何原本》是欧几里得几何学的奠基作，几乎包含了现在中学所学的平面几何、立体几何的全部内容。它是由定义、公设、公理、命题组成的演绎推理系统。每一个命题（相当于现在的定理）都是以公设、公理或它前面



错乱的空间　埃舍尔　版画

爱因斯坦的相对论提出之后，人们对时空有了新的认识。在埃舍尔的作品里，充斥着空间的错乱。

形），为了保证对角线相等，另外的一根小棍将成为我们的测量棍。然后我们把相似的另外一些正方形加到这个正方形上，每一个正方形都有一边与第一个正方形共有。对于这些正方形我们都采取相同的做法，直到最后整个桌面都铺满了为止。在这一排列中，每一正方形的每一边都隶属于两个正方形，每一隅角都隶属于四个正方形。



毕达哥拉斯定理原稿

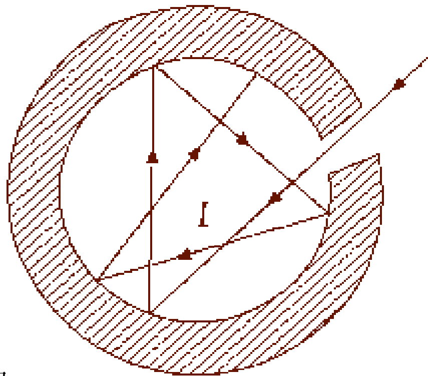
毕达哥拉斯学派宣扬上帝用数学来统治宇宙。毕达哥拉斯本人没留下什么著作，直到公元前140年，希腊学者阿波罗多罗斯用诗句写了一部《希腊编年史》，其中提到“毕达哥拉斯为了庆祝他发明的那个著名定理，宰牛作为祭祀的牺牲”。后来，很多人都倾向于相信那就是勾股定理。图为毕达哥拉斯定理原稿。

如果尽力避免在困惑中迷失方向而把这项工作做好的话，我们会发

的命题作为证明的依据，按逻辑相关性排列而成。欧几里得的这种逻辑地建立几何的尝试，成为现代公理法的源流，在历史上受到很高评价。

非欧几里得几何学

非欧几里得几何学（non-Euclidean geometry）是不同于欧几里得几何学的几何体系，简称“非欧几何”，一般是指罗巴切夫斯基几何（双曲几何）和黎曼的椭圆几何。它们与欧氏几何最主要的区别在于公理体系中采用了不同的平行公理。



黑体辐射示意图

19世纪，科学家们普遍认为古典力学的理论已趋于完备，然而对于黑体辐射(blackbody radiation)存在现象，却无法用古典理论予以解释，对于黑体辐射所衍生的问题，在科学家的努力下渐渐揭开其神秘面纱，在揭开其神秘面纱的同时也引领我们进入了另一全新的领域——量子力学。

非欧几何的历史渊源及发展。它的起源可追溯到人们对欧几里得平行公理的怀疑。从古希腊时代到公元1800年间，许多数学家都尝试根据欧几里得的其他公理去证明欧几里得平行公理，结果都归失败。19世纪，德国数学家C．F．高斯、俄国数学家H．罗巴切夫斯基和匈牙利数学家J．波尔约等人各自独立地认识到这种证明是不可能的。也就是说，平行公理是独立于其他公理的，并且可以用不同的“平行公理”替代欧几里得平行公理而建立非欧几何学。高斯关于非欧几何的信件和笔记在他生前一直没有公开发表，只是在1855年他



笛卡儿　油画

笛卡儿，西方近代资产阶级哲学奠基人之一。他的哲学与数学思想对历史的影响是深远的。人们在他的墓碑上刻下了这样一句话："笛卡儿，欧洲文艺复兴以来，第一个为人类争取并保证理性权利的人。"

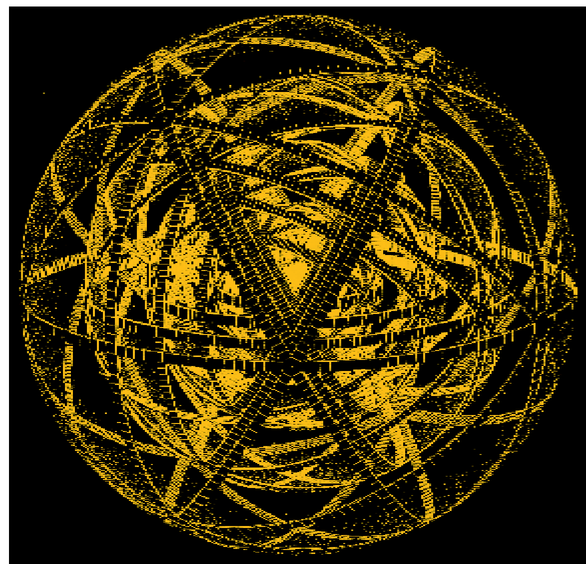
现当三个正方形相会于一隅角时，第四个正方形的两边就已经给出。因此，这个正方形另两边的排列位置也就完全确定，但是我不能安排合适的角度使这个四边形的两根对角线相等。如果这两根对角线自己趋向相等，那么我就只能怀着感激的心情将这一切归咎于大理石板和小棍的特别恩赐而惊奇不已。我们必须经历许多这样的惊奇，如果上述解释是正确的话。

如果每件事都进行得真实而平稳，那么大理石板上的诸点对于小棍而言构成一个欧几里得连续区域，这里的小棍被习惯性地当做"距离"（线间隔）使用。选取正方形的一



去世后出版时才引起人们的注意。罗巴切夫斯基和波尔约分别在1830年前后发表了他们的关于非欧几何的理论。在这种新的非欧几何中，替代欧几里得平行公理的是罗巴切夫斯基平行公理：在一平面上，过已知直线外一点至少有两条直线与该直线共面而不相交。由此可以演绎出一系列全新的无矛盾的结论。在这种几何里，三角形内角和小于两直角。当时罗巴切夫斯基称这种几何学为"虚几何学"，后人又称为"罗巴切夫斯基几何学"，简称"罗氏几何"，也称"双曲几何"。

同心的外壳



德国数学家D.希尔伯特于1899年发表了著名的《几何基础》一书，严密地建立了欧几里得几何的公理体系。它由五组公理组成，即结合公理、顺序公理、合同公理、平行公理及连续公理（见欧几里得几何学）。由结合公理、顺序公理、合同公理、连续公理四组公理所建立的体系称为"绝对几何公理体系"。

个隅角作为“原点”，我能将任一正方形的任意隅角相对于原点的位置用两个数来表示。我仅仅需要声明的是，我从原点出发，继续向“右”走和向“上”走，经过了多少根杆子才能到达所考虑的正方形的隅角呢？这两个数就是“笛卡儿坐标系”的“笛卡儿坐标”，由隅角相对于排列的小杆而确定。

勒贝格
摄影　20世纪
　　勒贝格的积分理论可以说是20世纪数学开门红的重大成果之一，但勒贝格从1902年论文发表起差不多10年内在巴黎都找不到工作，直到1910年才获准到巴黎大学任职，1921年成为法兰西学院教授。

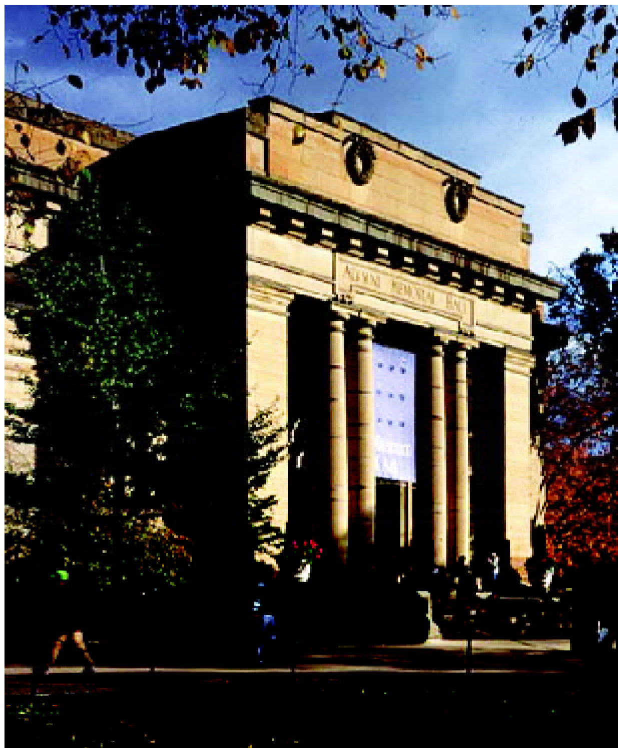


如果改变一下这个抽象的实验，我们会认识到一定会出现实验不能成功的案例。我们假定这些杆子是“膨胀”的，膨胀的量值与温度升高的量值成正比。我们使大理石板的中心部分变热，但外围的热量不变，在

绝对几何公理体系加上罗氏平行公理，就构成了罗巴切夫斯基几何的公理系统。

绝对几何是欧氏几何与罗氏几何的公共部分，也就是说，绝对几何的全部公理和定理在两种几何里都成立。例如命题“任意一个三角形内角和不能大于两个直角”是绝对几何里的定理。

罗氏平行公理。它是欧氏平行公理（通过直线外一点只有一直线与已知直线共面不交）的否定命题，即“過过直线外的每一点至少有两条直线与已知直线共面不交”。



密歇根博物馆　摄影
美国著名博物馆，其收藏品非常丰富。

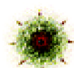


密立根与爱因斯坦　　摄影

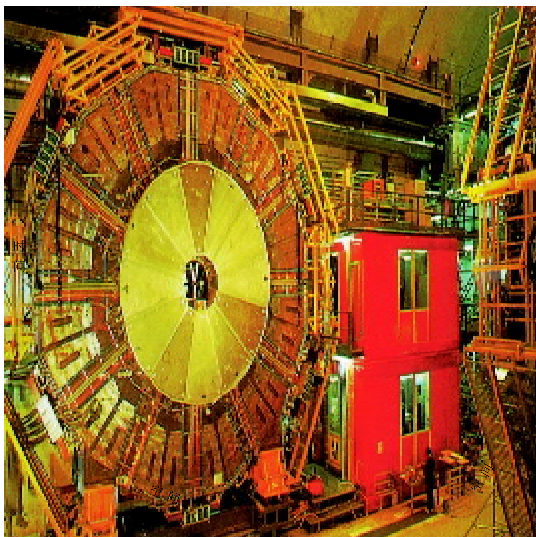
密立根是美国著名的物理学家，他测量出了电子电荷值。图中右为密立根。

此情况下，我们仍然能使两根小棍在桌面上的每一位置相重合。但在加热期间我们的正方形必然会受到扰乱，因为桌面中心的小棍膨胀了，而外围部分的小棍则不膨胀。

我们将小棍定义为单位长度。这块大理石板是一个非欧几里得连续区，而且我们的小棍也不可能被借用来定义笛卡儿坐标，因为上面的作图法不能够完成。但是由于有一些其他的东西并不像受桌子温度影响的小棍般（或许丝毫不受影响），因而我们有可能对下述观点持自然的支持态度，即大理石板仍是一个“欧几里得连续区”，所以我们要满意地实现欧几里得连续区，就必须对长度的量度或比较作一个更为巧妙的约定。



但是如果把各种杆子（例如各种材料所制的）放在冷热不均的大理石板上时，它们对温度的反应都是相同的。如果除了杆子之外，我们没有其他的方法来探测温度，于是我们最好的办法就是：只要能够使我们的一根杆子的两端与石板上的两点的距离相重合，我们就将该两点之间的距离定义为1。因为如果不如此，我们将在对距离下定义上犯任意独断的错误。所以，我们只有舍弃笛卡儿坐标，而以不采取欧几里得几何学对刚体的有效性这一方法来代之。读者们将会看到，这里所描述的情形符合广义相对性公设（本章第六节）。



水中的粒子　　合成图片

我们利用显微镜，可以看到悬浮在水中的尘埃粒子以非常不规则的随机的方式运动。爱因斯坦利用这一“布朗运动”来显示，水是原子构成的。

2.8 高斯坐标

高斯坐标分析问题的方法与几何方法结合起来可由下述途径达成。设想我们在桌面上画一任意曲线系 U，并且每一根曲线用一个数来标明。图 4 中的曲线有 U=1、U=2 和 U=3，假如在 U=1 和 U=2 之间有无限多的曲线而且这些曲线对应于 1 和 2 之间的实数，于是我们得到一个“无限稠密”的、布满整个桌面的 U 曲线系。

这些 U 曲线系是彼此不相交的，并且通过桌面上的每一点的曲线都是仅有的、独一无二的，这样，桌面上的每一点都有一个确定了的 U 值。以同样的方式画一个所满足的条件与 U 曲线相同的 V 曲线系于桌面，V 曲线标有的数字以及其任意形状与 U 曲线一致。于是，桌面上除了 U 值外，还

附：

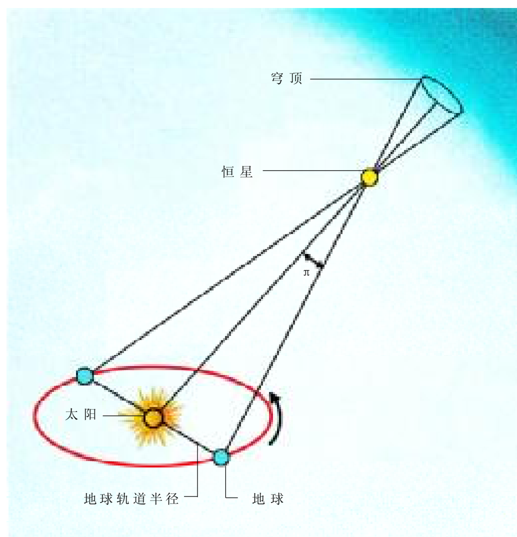
高斯：学讲话以前就学会了计算

高斯的父亲是泥瓦厂的工头，每星期六他总是要发薪水给工人。高斯 3 岁那年夏日的一天，高斯的父亲正在给工人发薪水，小高斯站起来说：“爸爸，你弄错了。”然后他说了另外一个数目。重算的结果证明小高斯是对的，大人被惊得目瞪口呆。

高斯说，他在学讲话之前就已经学会了计算。

高斯 10 岁时做的那道题——求 1+2+3+…+99+100 之和，充分展现了高斯的数学天分。

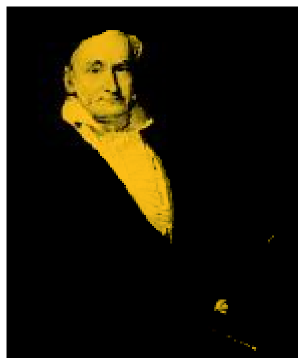
卡尔·弗里德里希·高斯（1777~1855 年），德国数学家、物理学家和天文学家。哥廷根大学毕业，赫尔姆施泰特大学哲学博士。长期任哥廷根大学教授，哥



恒星视差　示意图

17 世纪光学仪器发明后，人们认识到星球并不是挂在天球上的，宇宙是向纵深延伸的。这时，测量恒星的距离就成为一个迫切的问题了。1838 年，德国天文学家贝塞耳通过三角视差的方法测量出了天鹅座 61 的距离。这幅图就表现了测量恒星的方法：测量恒星 E 的距离，是靠他的年视差 π 来推算的。年视差则靠从地球上观测该恒星相隔半年在天空穹顶移动的距离来测量。



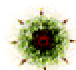


高斯及其论文

高斯是德国数学家、天文学家和物理学家，被誉为历史上伟大的数学家之一，他和阿基米德、牛顿并列，同享盛名。高斯的成就遍及数学的各个领域，在数论、非欧几何、微分几何、超几何级数、复变函数论，以及椭圆函数论等方面均有开创性贡献。他十分注重数学的应用，并且在对天文学、大地测量学和磁学的研究中也偏重于用数学方法进行研究。

有一个 V 值，这便是我们称之为的桌面的坐标（高斯坐标）。例如，图 4 中的 P 点就有 $U=3$，$V=1$ 这一高斯坐标，桌面上相邻的 P 和 P' 就有其各自对应的坐标：

这里的 Du 和 Dv 是标记很小的数。依此类推，我们可以好似把一根小棍当做量杆般，用 DS 这一很小的数表示



廷根天文台台长。早期研究数论，成果收入他所著的《算术研究》中。对超几何级数、复变函数论、统计数学、椭圆函数论有重大贡献。他的曲面论是近代微积分几何的开端。他建立了最小二乘法，并沿着拉普拉斯的思想方法，继续发展了势论。对物理、天文学、测地学等也有很大贡献。他奠定了在平衡状态下液体的理论基础；研究地磁强度，与德国物理学家韦伯（1804~1891 年）共同建立了电磁学中的高斯单位制；用自己的行星轨道计算法和最小二乘法算出意大利天文学家皮亚齐（1746~1826 年）发现的谷神星的轨道；晚年写成了《天体运动论》。曾独立发现“非欧几何学”，但未发表。此外，还有向量分析的高斯定理、代数基本定理的证明、正十七边形的作图、关于正态分布的密度曲线、质数定理的验算等研究成果。有《高斯全集》十一卷。

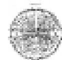
极坐标系

极坐标系是由一个极点和一个极轴构成，极



韦伯纪念碑　雕塑

韦伯在电磁学上的贡献是多方面的。为了进行研究，他发明了许多电磁仪器。1841 年发明了既可测量地磁强度，又可测量电流强度的绝对电磁学单位的双线电流表；1846 年发明了既可用来确定电流强度的电动力学单位，又可用来测量交流电功率的电功率表；1853 年发明了测量地磁强度垂直分量的地磁感应器。为表彰其在物理学方面的巨大贡献，人们建立了纪念碑表示对他的崇敬。



P 和 P' 的线间隔距离，根据高斯的记述，我们有：

$$DS^2=G_{11}DU^2+2G_{12}UDV=G_{22}DV^2$$

这里的 g_{11}、g_{12}、g_{22}，取决于 U 和 V 的量，是一种完全确定的方式。这三个量，g_{11}、g_{12}、g_{22} 是决定量杆相对于 U 和 V 的曲线的行为，亦是决定量杆相对于桌面的行为。我们所考虑的桌面上的诸点相对于量杆构成了一个欧几里得连续区。只有在产生这一连续区的情况下，我们



木星的卫星　太空摄影

伽利略是伟大的意大利物理学家和天文学家，是现代科学的奠基者，近代物理学之父。他发明了天文望远镜，发展了天文学，第一次将实验方法和数学方法全面引入科学研究。图为伽利略用望远镜所观察到的木星的卫星。

轴的方向为水平向右。平面上任何一点 P 都可以由该点到极点的连线长度 ρ（>0）和连线与极轴的交角 θ（极角，逆时针方向为正）所定义，即用一对坐标值（ρ，θ）来定义一个点。

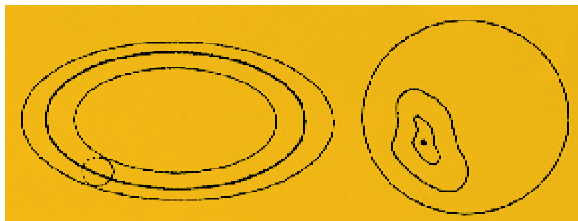
平面极坐标系

在平面问题中只需用二维坐标系就够了。常用的二维坐标系中，有二维直角坐标系和平面极坐标系。利用平面极坐标系研究曲线运动，特别是圆周运动非常方便。

在所研究的平面内，取参考系上一固定点 O 作为极点，过极点作一条固定射线 Oa（或 Ox）作为极轴，就构成了平面极坐标系。对于平面内任意一点 P，连线 OP 称为点 P 的极径，用 ρ 表示；自 Oa 到 OP 所转过的角称为点 P 的极角，用 θ 表示。极径和极

数学中的单连通　示意图

单连通具有一种拓扑性质。如图，在曲线上任意画一个闭圈，如果能在不离开曲面的情况下，将这个闭圈缩成一点，就称该曲面是单连通的。二维球面是单连通曲面，环面则不是。





星系　合成图片

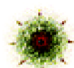
宇宙中的各种星系组成了宇宙的全部。

画出或用数学公式简单地将 U 曲线和 V 曲线表示出才有成功的可能。现在，我们用数字表述如下：

$$DS^2=DU^2+DV^2$$

这个公式说明：在所表述出来的条件下，U 曲线和 V 曲线是欧几里得几何学里相互垂直的直线，而且高斯坐标亦成了笛卡儿坐标。很明显，高斯坐标在这里表现出的是彼此相差极微的数值与“空间中”相邻的点的一种连续统一的关系。

这些对二维连续区的论述迄今为止是成立的，但高斯的方法也可运用于更多的连续区，如三维、四维或多维等。对一个四维连续区，我们可以这样来表示：我们取任意四个数值 x_1、x_2、x_3、x_4，它们如果与四维连



角，即（ρ，θ）是唯一确定点 P 位置的两个量，就称为点 P 的极坐标。

显然，平面极坐标与二维直角坐标之间的变换关系可以表示为

我们可以利用这种关系，在这两种坐标系之间互相转换。在平面极坐标系中，也定义了两个单位矢量，即径向单位矢量和横向单位矢量。径向单位矢量沿极径增大的方向，横向单位矢量与径向单位矢量垂直，沿极角增大的方向。

哥廷根数学研究所　摄影

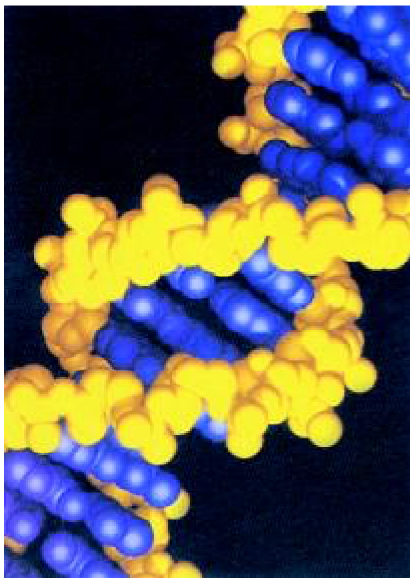
哥廷根学派是在世界数学科学的发展中长期占主导地位的学派，该学派坚持数学的统一性。高斯开始了哥廷根数学学派的起始时代，他把现代数学提升到一个新的水平。黎曼、狄利克雷和雅可比继承了高斯的工作，在代数、几何、数论和分析领域作出了贡献，克莱因和希尔伯特使德国哥廷根数学学派进入了全盛时期，哥廷根大学因而也成为数学研究和教育的国际中心。



续区中的每一点都是连续统一的，就被称为“坐标”，相邻的点与相邻的坐标值相对应。被物理的观点测量和明确了的距离DS与相邻的点P和P'的值相符合的话，那么下式成立：

$$\mathrm{D}S^2=G_{11}\mathrm{D}x_1{}^2+2G_{12}\mathrm{D}x_1\mathrm{D}x_2\cdots G_{44}\mathrm{D}x_4{}^2$$

其中，作为一个等量的值，g_{11}随连续区中位置的变化而变化，要使坐标$x_1\cdots x_4$与这个连续区的点有连续统一的关系，必须



DNA 双螺旋分子　合成图片

双螺旋的发现标志着抽象的拓扑学与生物学相结合。采用把DNA的纽结放开再把它们复制出来的办法去了解DNA的结构，这就使代数拓扑学中的纽结理论有了用武之地。



应该指出的是，径向单位矢量的方向和横向单位矢量的方向都是随所讨论的点的位置的不同而不同的。若质点的位置在随时间变化，则这两个单位矢量的方向也都在随时间变化。正因如此，我们说它们都是时间的函数，并分别表示为和。表面看起来，这使得运动学公式变得繁杂了，而实际上正是由于这一特点，使问题变得更加简明了。

高斯平面直角坐标系

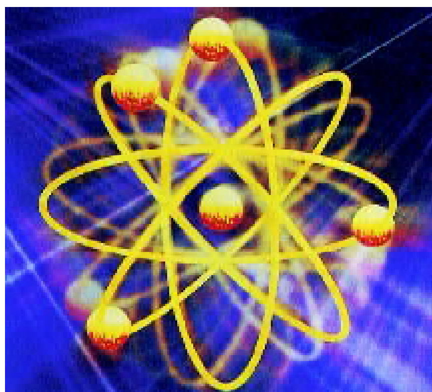
利用高斯投影法建立的平面直角坐标系，称为高斯平面直角坐标系。在广大区域内确定点的平面位置，一般采用高斯平面直角坐标。

高斯投影法是将地球划分成若干带，然后将每带投影到平面上。投影带是从首子午线起，每隔经度6°划分一带，称为6°带，将整个地球划分成60个带。带号从首子午线起自西向东编，0°～6°为第1号带，6°～12°为第2号带……位于各带中央的子午线，称为中央子午



几何与色彩　合成图片

几何形体与色彩的协调结合，构成了一幅美妙的画面。



原子示意图

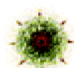
每个元素的原子均互不相同，也就是每一元素各有独特的原子结构。根据古典的玻耳原子模型，原子为行星状的结构，原子中心的原子核，由外围运转的电子绕着一定的轨域所包围。

得使该坐标是一个欧几里得连续区，如果关系式成立，我们便有：

$$DS^2=Dx_1^2+Dx_2^2+Dx_3^2+Dx_4^2$$

这一情况表明，一些与三维测量相似的关系同样适用于四维连续区。

但在用高斯方法表述 DS^2 时，其主要问题是必须使我们所考虑的连续区中各个极其微小的区域都被看做是欧几里得连续区，这一并不经常适用的方法才有可能成立。在考虑大理石桌面和局部温度受热不均匀而产生变化这一点上，这种方法是成立的。温度被桌面的一小部分面积视为恒量，因而欧几里得几何

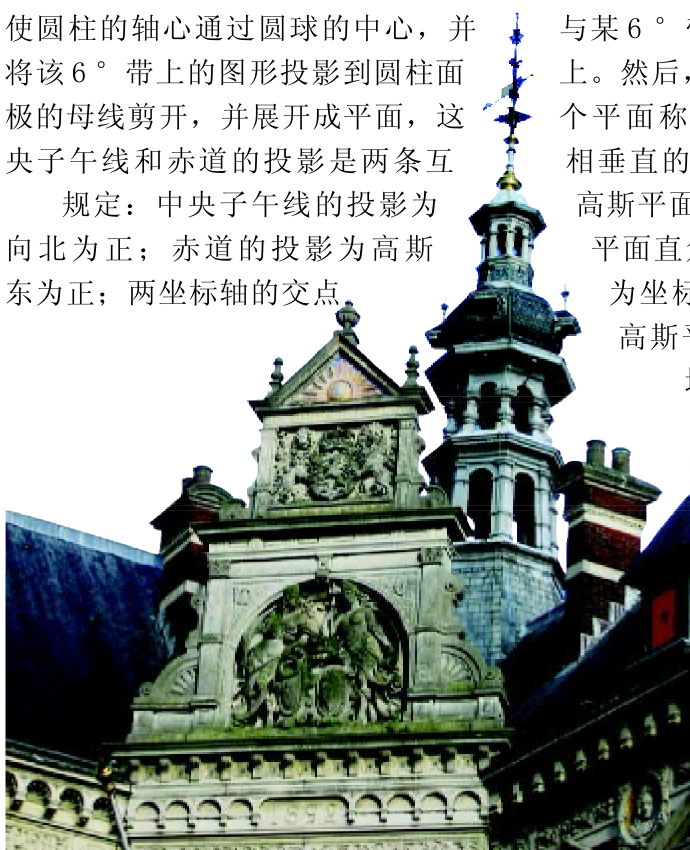


线。

我们把地球看做圆球，并设想把投影面卷成圆柱面套在地球上，使圆柱的轴心通过圆球的中心，并与某6°带的中央子午线相切。将该6°带上的图形投影到圆柱面上。然后，将圆柱面沿过南、北极的母线剪开，并展开成平面，这个平面称为高斯投影平面。中央子午线和赤道的投影是两条互相垂直的直线。

规定：中央子午线的投影为高斯平面直角坐标系的纵轴 x，向北为正；赤道的投影为高斯平面直角坐标系的横轴 y，向东为正；两坐标轴的交点为坐标原点 O。由此建立了高斯平面直角坐标系。

地面点的平面位置，可用高斯平面直角坐标 x、y 来表示。



乌得勒支大学　摄影

乌得勒支大学位于荷兰第四大城市乌得勒支市，是荷兰所有13所大学中历史最悠久的一所，也是其中最好的三所大学之一。乌大最早起源于中世纪，与乌得勒支城市的发展始终紧密相关，可以说乌城的发展促成了大学的创建和扩展，而大学的发展又反过来促进了乌城的繁荣。

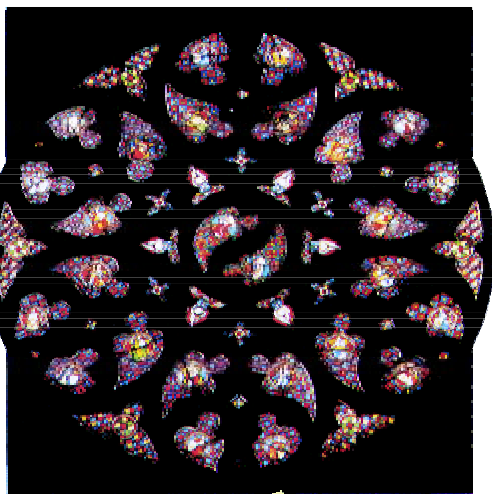
学的法则就通过小棍的几何行为表现出来。当用正方形作图法作图，其作图的面积占桌面极大部分时，它的缺陷便明显地显露出来。对此，我们的总结是：高斯对一般连续区的表述，发明出了一种数学的方法，在其中他定下了“大小关系”（相邻点的距离）的定义。对于一个不论是多少维的连续区中的每一点，高斯皆以若干数字标出（高斯坐标），每个点所标的数字是独一无二且相邻点之间亦以一个彼此之间无穷小的数（高斯坐标）来标出。高斯坐标既是笛卡儿坐标系的推广，也适用于非欧几里得连续区。当然，这一适用是有限制的，也只有在相对于既定的“大小”或“距离”的定义中，以及所考虑的连续区中各个区域部分越小，表现得越像一个真正的欧几里得系统时才有用。



正在形成的恒星　合成图片

天文学界对小、中质量恒星的形成规律已形成共识：它是通过最初的引力塌缩与后随的质量吸积形成的。但对大质量恒星的形成规律却不清楚。对此，天文学界主要有两种猜测：一种认为大质量星是通过小质量星的并合而形成；另一种等同于小恒星的形成，认为是通过最初的引力塌缩与后随的质量吸积而形成。后一种理论必须要有“拱星盘”的存在，而并合理论则认为不存在这样的系统。因此，通过天文观测来确认大质量星周围的盘系统成为判别这两种理论正确与否的关键因素。而此前这两种理论都缺乏相关的观测证据，原因是大质量恒星非常稀少，且通常距离太阳系很远。



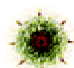


2.9 狭义相对论的空间—时间连续区可以当做欧几里得连续区

闵可夫斯基只在第一章第十七节中含糊地谈到的一个观念，我们现在已经有更严谨的表述方法。按照狭义相对论，对于四维空间—时间连续区，我们要优先用被我们称

彩绘玻璃窗

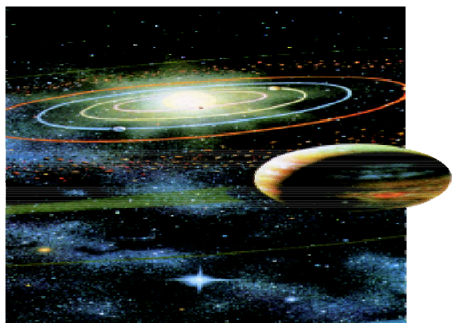
这是装饰法国里昂大教堂窗户的彩绘玻璃，其图案似乎可以比拟大爆炸理论：窗上没有中心，上面的图案相互远离，就像宇宙在膨胀时期相互远离的星系。



附：

球面坐标

我们把目光从平面转向曲面，就会发现：用单一的直角坐标系不能覆盖整个曲面。在曲面上，使用曲面坐标系显然更为直接和方便。在我们最为熟悉的曲面——球面上，人们经常使用球面坐标。它其实就相应于用以标识地球表面上某点位置的“纬度”和“经度”。



日全食　太空摄影

当发生日食时，月球正运行在地球和太阳中间，月球椭圆形的影子投影到地球表面。由于地球和月球都在运动，所以月球的影子以很快的速度扫过地球表面。在投影扫过的区域内，人们就可以看到日全食。扫过的这片长条形区域成为全食带。这幅摄影就表现了日全食时太阳圆盘的景象。

球面坐标，是空间的一种曲线坐标。

空间中之任一点 P，其参数为：①P 之半径 $r=OP$，即 P 至一固定点 O 之距离，O 称为极；②P 之余纬度 θ，即向量和一固定轴 ON 之夹角，ON 称为极轴；③P 之经度 ϕ，即平面 NOP 和一含极轴之固定平面 NOA 之夹角，此固定平面称为原子午面。

通常限制此三个参数之范围为 $0<r<\infty$，$0\leqslant\theta\leqslant\pi$，$0<\phi<2\pi$。在极轴上之点，$\phi$ 可为 0 和 2π 间之任意实数。

为“伽利略坐标系”的某些坐标系来描述。这些坐标系在确定一个事件，或者说在用 x、y、z、t 四个坐标确定四维连续区中的一个点时，在物理意义上具有简单的定义，对此第一部分已有所论述。洛伦兹变换方程的完全有效性，在于从一个伽利略坐标过渡到相对于这个坐标系做匀速运动的另一个伽利略坐标。作为表述光的传播定律对于一切伽利略参考系的有效性，洛伦兹变换方程是构成从狭义相对论导出推论的基础。

闵可夫斯基发现洛伦兹变换满足下列简单条件。让我们考虑两个在四维连续区中的相对位置，是参照伽利略参考物体 K，用空间坐标差 dx、dy、dz



项圈　雕刻

这是凯尔特人用金子打造的项圈，金子在现代已经是非常流行，然而要形成金原子核，就需要高温，这种高温必须达到36 亿年前巨星爆炸所产生的温度。

球面坐标之坐标曲面为：①r = 常数 ≠ 0，为同心的球面，心在极点；② θ = 常数 ≠ 0，π / 2 或 π，为直圆锥面，顶点在极点，轴为极轴。若 θ = 0、π / 2 或 π，为平面；③ ϕ = 常数，为含极轴之平面。

若我们建立一直角坐标系，使原点和极点重合，极轴为公轴，原始子午面为 xoz 平面，则可以得到球面坐标和直角坐标间之关系为：

$$x = r\sin\theta\cos\phi$$

$$y = r\sin\theta\sin\phi$$

$$z = r\cos\theta$$

有时候我们用 P 代表半径，ϕ 代表余纬度，θ 代表经度。球面坐标亦称为地理坐标，或空间的极坐标。

任意坐标系

坐标系的设置有很大的任意性。在平面上，除了上文提到的直角坐标系和极坐标系之外，还可以设置诸如斜角坐标系、椭圆坐标系、曲线坐标系等。



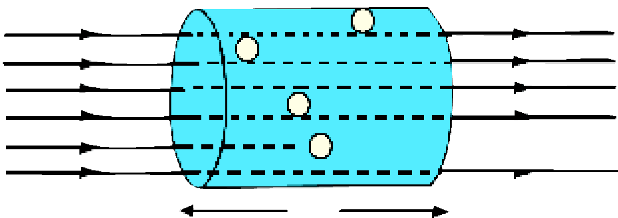
幻想画　素描

格兰威尔在其小说中描绘的耍弄星体的印第安人，使人们想起现代科学的一个概念：我们看不到与地球平行的星体。

辐射吸收　示意图

分子辐射吸收现象：分子至少含有两个原子且彼此受到一些能量的牵制，这能量可写成 总能量 = 滚动能 + 振动能 + 电子解离能 。

分子滚动能量其辐射吸收仅在红外线之外，若再加上振动能也仅进入红外线光谱区附近，假若要吸收光谱在可见光或紫外光区，就需关切电子解离、游离或跳离的情况判定，而有机化合物产生无色现象通常是吸收辐射光谱在紫外光区。



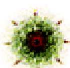
和时间差 dt 来表示的事件。我们假定它们参照另一伽利略坐标系的差为 dx_1，dy_1，dz_1，dt_1。那么这些总是满足条件：

$$dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2=dx^{12}+dy^{12}+dz^{12}-c^2dt^{12}$$

这个条件确定了洛伦兹变换的有效性，对此我们说：属于四维空间－时间连续区两个相邻点的量

$$ds^2=dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2$$

对于一切选定的（伽利略）参考物体的值都相同。如果用 x_1、x_2、x_3、x_4 代换 x、y、z，，也会



在同一个曲面上，引入的坐标系不同，度规各分量一般也会有不同的值。它们由坐标变换关系互相联系，并且可以互相变换。

时空连续区和物质的关系

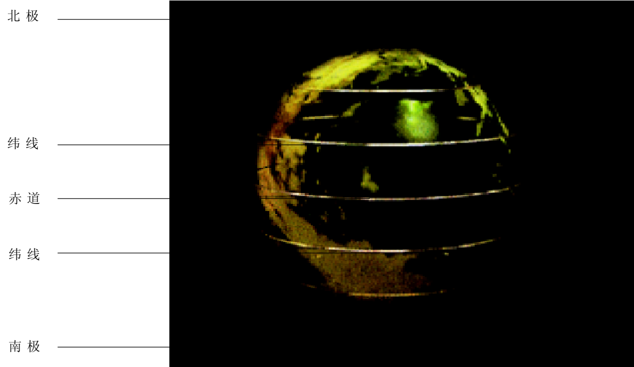
时空同物质紧密联系，已成公理，而时间和空间是否可以脱离物质而独立存在，则令人费解。

时间和空间是客观的。物质就其含义而言，应该包括时间和空间。

我们以具体实物来说明。时间和空间不能离开物质。把一实物从时空连续区搬走，而时空连续区仍然存在。这时，物质似乎已脱离了空间和时间。但是，时空连续区存在于空间和时间，是以空间为基础和条件的。这个时间，是静止的时间，也就是空间。时空连续区的时间和空间，其实质是空间，我们认定

地球　合成图片

在“无边界”设想中，宇宙沿着大多数历史的机会是可以忽略不计的，但是有一组特别的历史比其他的历史有更多的机会。这些历史可以描绘得像是地球的表面。在那里与北极的距离代表虚的时间，并且离北极等距离的圆周长代表宇宙的空间尺度。宇宙是从作为单独一点的北极开始的。当人们一直往南走时，离开北极等距离的纬度圈变大，这是和宇宙随虚时间的膨胀相对应的。



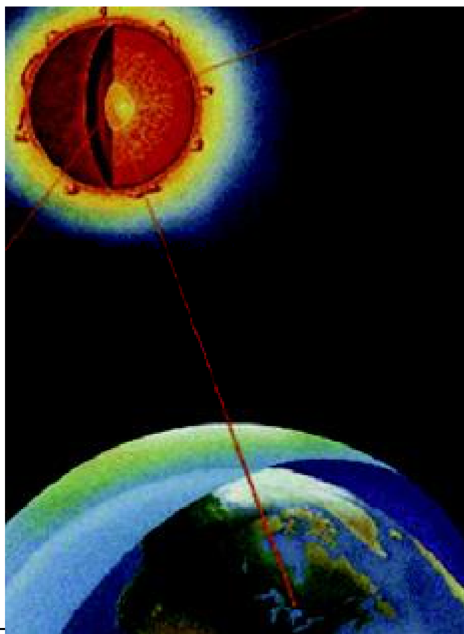
地球

得出同样的结果：

$$ds^2=dx_1^2+dx_2^2+dx_3^2+dx_4^2$$

即与参考物体的选取无关。量 ds 为两个事件或两个四维点之间的“距离”。

因而如果我们将选取的虚量作为时间变量，就可以按照狭义相对论把空间－时间连续区当做一个“欧几里得”四维连续区，该结果可由前节论述推出。



中微子质量　合成图片

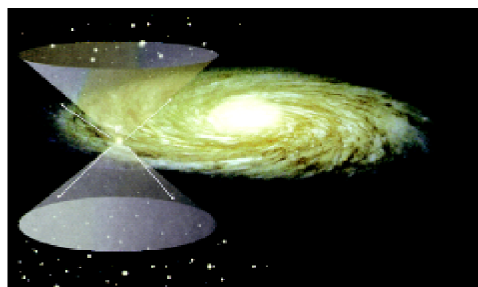
中微子有三种类型，电子中微子、μ中微子和τ中微子，在粒子物理学的标准模型中中微子没有质量。然而，现在发现的中微子具有质量的有力证据将迫使人们修改这一模型。太阳会产生大量的电子中微子，在超新星爆发中则会产生全部三种中微子。然而对于中微子的检测是非常困难的，因为它们电是中性的，并且仅通过弱相互作用同其他物质起作用。



的这个存在的时间和空间，其实是空间存在，而时间业已转化为空间。在空间上，根据空间创造运动而创造实物的原理，物质尚未形成时间，时间在这里其实充当了我们所不能证实和发现的实物。由无到有的空间的缩小—时间增大—实物质量增加的事实，充分给我们证明了物质在一定条件下所表现的不同形式，就是说，在时空连续区假定的实物搬走以后，留下的空间和空间中的时间就是我们所要寻找的物质。如果我们在留下的一无所有的空间中等待漫长的几千年，我们就可以证实一个新的微小的实物在空间的运动中又诞生了。这也就是宇宙中生命诞生及物质形成的最新型的理论。

空间和时间不能离开具体的物质而存在，其意思是要求证明在空间上，物质与空间和时间的不可分割性。而在时间上，即在具体的实物形式上，物质与时空不可分割的性质已被狭义相对论证实无疑。

这样，我们就可以认定，时空中的时间就是目前尚未认识到的物质。而时间的存在不可怀疑。所以，当时空连续区的实物和场搬走以后，留下时间和空间恰好说明是离不开物质的。而以时间的形式存在的物质其本身就是时间，可见，空间和时间不是能离开物质而独立存在的。

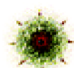


地球的公转　合成图片

地球（E）围绕着位于螺旋的银河系外部区域的太阳公转。螺旋臂上的恒星尘埃遮住了我们在银河系平面上的宇宙视野，但是我们在该平面的每一边的方向圆锥中的视野都非常清晰，而且能够画出遥远星系的位置。

2.10 广义相对论的空间—时间连续区不是欧几里得连续区

在本书的第一部分中，我们对狭义相对论简单而直接的物理性解释是基于空间—时间坐标之上的，这种空间—时间坐标在本章第九节是四维笛卡儿坐标，而这样做的基础建立于光速恒定定律。但是按照本章第四节，这个定律不适于广义相对论。根据广义相对论，我们得出，光速依赖于坐标的依据是必须存在有一个引力场。在本章第六节对一个具体例子进行讨论时，我们发现，



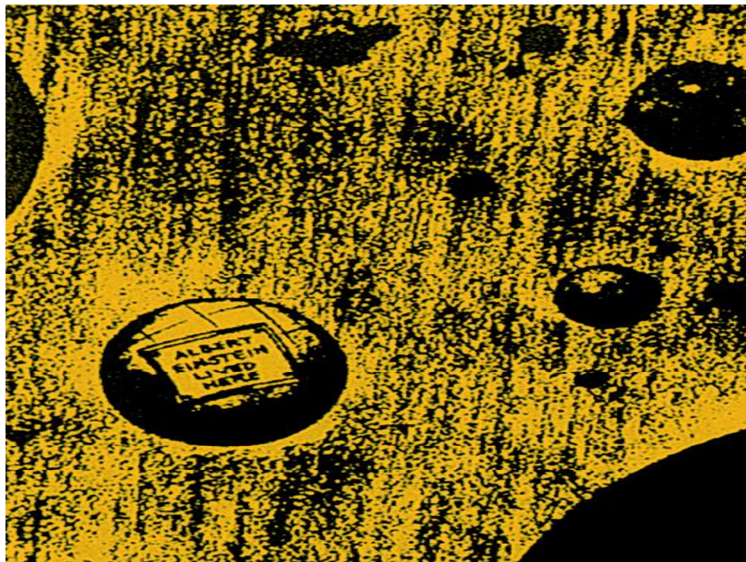
附：

绝对时空与相对时空

宇宙究竟是无限的，还是有限的？这是一个古老而又新鲜的宇宙尺度之谜。

记忆的永恒　达利　油画

达利是超现实主义画家，在其绘画中表现一些荒诞的东西。这幅画中，时间的测量工具——钟表仿佛融化了一般。



德国哲学家、星云起源说的假设者康德曾经提出著名的时空悖论，指出在关于宇宙到底是无限的还是有限的这个问题的理解上，人们必然存在着难以摆脱的矛盾。

牛顿曾设想：宇宙像一个既无限又空虚的大箱子，

正是由于引力场的存在，我们用来解释狭义相对论的坐标和时间的定义便失效了。

由于考虑到这些结果，我们于是深信，依照广义相对论，不能把空间—时间连续区认为是一个欧几里得连续区。我们认为是一个二维连续区的，只有在大理石板上局部温度存在变化的这一例子。在那里，等长的杆不能构成一个笛卡儿坐标系，因此这里的系统（参考物体）也

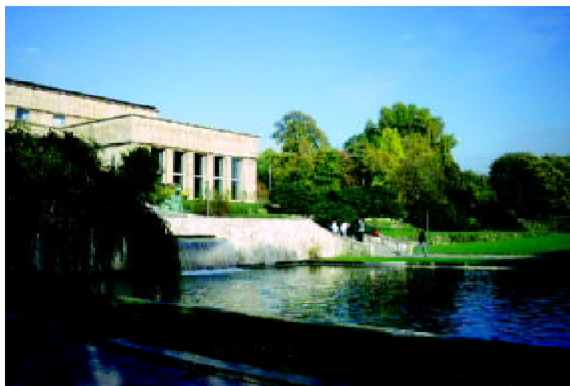


奥古斯塔纳学院　摄影

这是位于美国南达科他州的一所州立学院。

里面均匀地分布着无数恒星，它们靠着万有引力的作用而互相联系。他的观点引出了有名的“光度怪论”（即“奥伯斯佯谬”）。

为什么夜晚比白昼暗得多？如果宇宙果真无限广阔，而其中又果真均匀地分布着无限多个星体，那么在无数个“太阳”等距离照耀下的夜空，理应明亮得如同白昼。这样的推理合乎逻辑，但结论却与事实相悖。这是德国天文学奥伯斯于1826 年向科学界提出的疑难问题。



法兰克福大学　摄影

法兰克福大学，是德国最著名的前十所大学之一，创建于18 世纪，位于美茵河畔的法兰克福。法兰克福是德国的财经首都和重要的商业及工业中心之一，共有400 家银行和3　000 多家公司。法兰克福的商业气息、大都会气质及其自由求实的精神时刻影响着法兰克福大学。

1917 年，爱因斯坦提出了有限宇宙的模型，他认为，“把宇宙看做一个在空间尺度方面是有限闭合的连续区”，并从宇宙物质均匀分布的前提出发，在数学上建筑了一个前所未有的“无界而有限”、“有限而闭合”的“四维连续体”，即一个封闭的宇宙。根据爱因斯坦这个“球体宇宙”模型推想，在宇宙任何一个点上发出的一道光线，将会沿着时空曲面在100 亿年后返回它的出发点。同时，爱因斯坦还认为，宇宙赖以存在的时空（时间与空间）

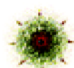


大卫·希尔伯特　摄影

大卫·希尔伯特（1862~1943年），德国数学家，是19世纪和20世纪初最具影响力的数学家之一。希尔伯特1862年出生于哥尼斯堡，1943年在德国格丁根逝世。他发明和发展了大量的思想观念（例如：不变量理论，公理化几何）而著名。

不可能用刚体和钟建立，使得量杆和钟在严格地做好安排的情况下直接指示位置和时间。这种困难的实质我们在本章第六节中曾经遇到过。

但是上述本章第八和第九节的论述给我们指出了战胜困难之路。当我们提及四维空间—时间连续区时，高斯坐标将是该连续区的一个可任意利用的参照坐标。我们指派连续区的每一个点（事件）为四个数x_1、x_2、x_3、x_4（坐标），这些数连最小的物理意义都没有，它们仅有的目的是以编号的方式将连续区的各点明确而任意地标出，它们的排列方法不需要把x_1、x_2、x_3当做“空间”坐标，或者一定要把x_4作为“时间”坐标　。



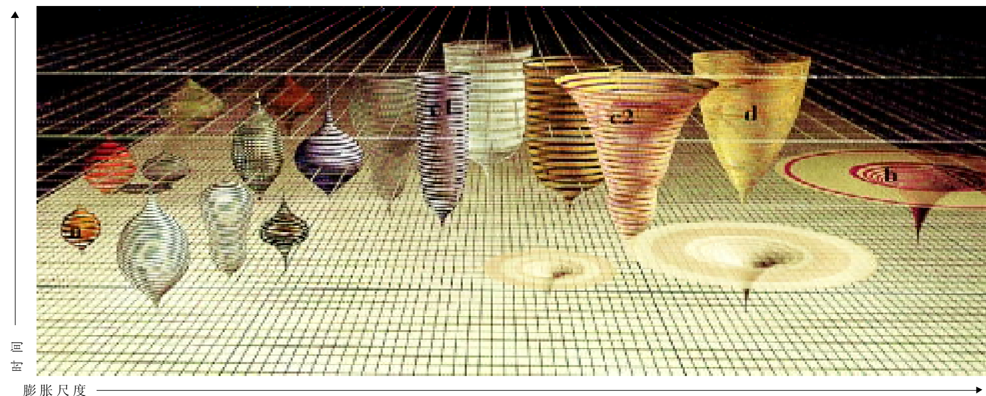
都是弯曲的，从而突破基于平直空间的欧几里得几何学的束缚，推导出宇宙无边界的结论。弯曲时空是一种全新的概念，它抹去了宇宙学研究中原有的机械形式部分。爱因斯坦狭义相对论把三维空间和一维时间联系起来，成为“四维时空统一体”。这种四维时空只是人们习以为常的三维欧几里得空间的简单推广，它依然是平直的；直就是直，曲就是曲，三角形三内角之和必为180°，绝无差错。

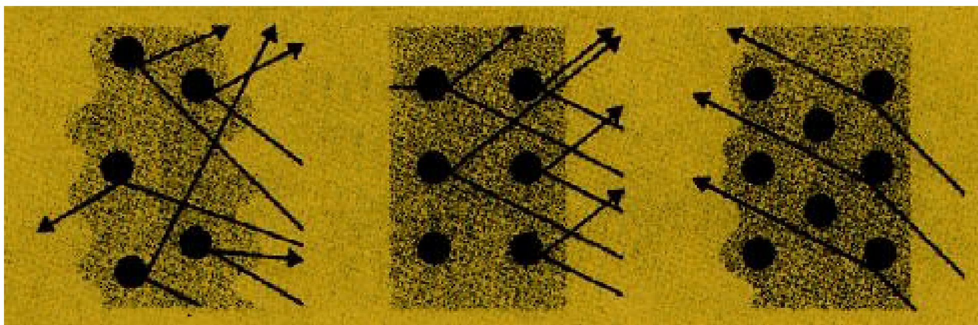
然而，要是我们站在球面上，而不是站在平面上考察问题，情况会怎样呢？

实际上，我们正是生活在地球表面这个大圆球面上。

宇宙的膨胀　分解图

根据“完全宇宙学原理”，哈勃常数不仅对空间各点是常数，而且不随时间变化，所以宇宙空间的膨胀在时间和空间上都是均匀的。宇宙空间在膨胀，而物质的分布又与时间无关，这样就必须有物质不断产生出来以“填补真空”，也就是填补宇宙膨胀所产生出来的空间。通过完全宇宙学原理和爱因斯坦场方程可以求出宇宙的时空结构，可以得到宇宙的三维曲率为零，也就是三维空间是平直的。





磁与电子相互作用　合成图片

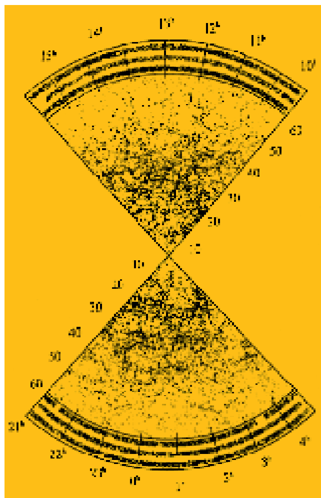
电磁相互作用和万有引力相互作用是基于我们日常生活中经常接触到的相互作用，强相互作用和弱相互作用是为了解释原子核结构而引进的两种相互作用，其中弱相互作用的作用程小于10~17米，强相互作用的作用程小于10~15米，这是传统对原子核内部结构的看法。

读者或许会认为，用这样一种方式来对世界进行描述显然是极其不严谨的。如果作为特定坐标的x_1、x_2、x_3、x_4本身无丝毫意义的话，那么将一个事件用这些坐标表示又有何意义？然而，更加小心的考虑说

如果超于地球之上，从空间的角度来看，地平线自然都是呈现曲线的，因为地球本身是一个球体。但如果置身于地面来看地平线，那么，在某段距离之内，我们看到的却是直线。这样，矛盾产生了，即以人类的位置角度来说，地平线到底是一条直线还是曲线？

实际情况是：多条线段连接成了一条圆形的曲线。

问题在于，平面弯曲了，变成球面，平面上的直线也随之弯曲了，变成了球面上的大圆线。平面三角形三内角之和等于180°，球面上三角形三内角之和大于180°。从平面变到球面，这就是二维空间弯曲的例子。



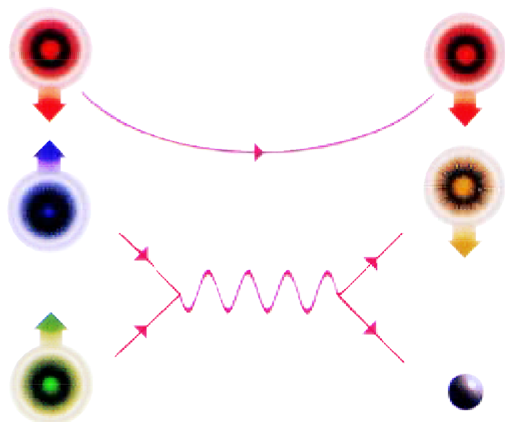
星系的分布　示意图

宇宙的星系大体均匀地分布于整个太空，有一些局部的聚集和空洞。星系密度在非常大的距离外显得有些下降，但这也是因为它们如此遥远而黯淡，以致我们看不到。我们所能作的推论就是，宇宙在空间中是永远延伸下去的。

爱因斯坦的广义相对论，把物质世界与弯曲的四维时空联系起来；凡有物质之处，时空便弯曲。他借助于非欧几何，推导出宇宙有限而无界的结论。试想上述二维球面有限大小，但并无边界，在球面上行走，尽头永无止境，四维时空空间正是这样一种弯曲空间。

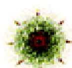
爱因斯坦的宇宙模型是一种静态模型，三维超球面不会膨胀，也不会收缩。他认为，宇宙整体是恒静不动的。

明，这种担忧是没有理由的。以我们正在考虑的一个正在作任意运动的质点为例，如果这个点只是霎那间存在，而没有一个持续期间，那么该点在空间—时间的描述，即由单独的x_1、x_2、x_3、x_4表示。因此对于永久的点，对其描述的数值必须有无穷多个，并且其坐标值必须紧密相连，以便能显示出连续性，与此质点相对应的便是四维连续区中的一条（单一空间的）线。同样地，任何这样的线，必然也与连续区中许多运动的点



大统一理论　合成图片

现在，人们发现微观粒子之间仅存在四种相互作用力，它们是万有引力、电磁力、强相互作用力、弱相互作用力。宇宙间所有现象都可以用这四种作用力来解释。进一步研究四种作用力之间联系与统一，寻找能统一说明四种相互作用力的理论称为“大统一理论”。

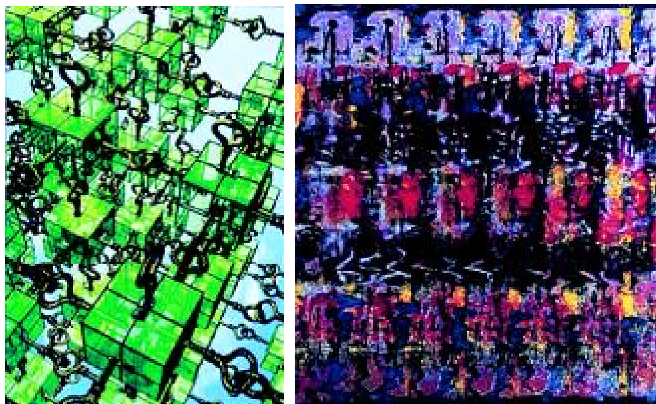


爱因斯坦为探索物质运动规律作出了卓越的贡献，但却在这一观点上铸成了他“一生中最大的错误”。不过他毕竟是一位尊重事实的科学家，在新的天文观测资料面前，他很快就放弃了这种“恒静不动”的假设。

“奥伯斯佯谬”从出笼伊始，就建立在一个错误的基点上。

牛顿认为，宇宙像一个无边界的大箱子。可是在人类的思维系统中，箱子肯定都是有边有界的。我们怎么去想象那个无边界的大箱子呢？

牛顿用大箱子，只是想说明，众多的恒星在里面能够因为吸引力的相互作用，永恒而固有地运行着。这样，在太阳系的行星运行系统里，牛顿以上帝的“第一次推动”而完成了地球进入轨道运行的所有难题。而在大宇宙空间中，牛顿又用箱子形式来解决万有引力与星球进入运行轨道所必需的推动力问题。



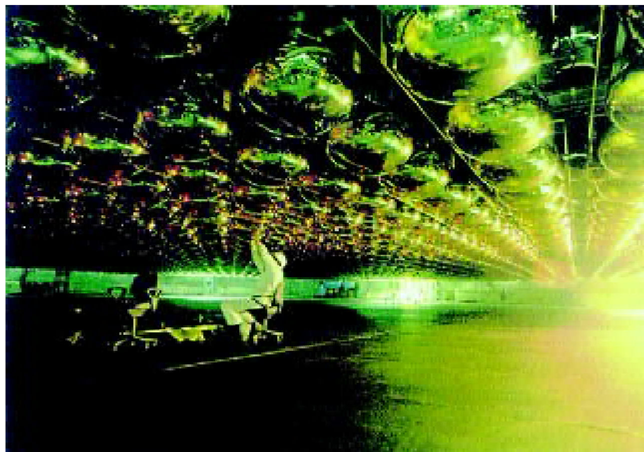
量子密码　合成图片

随着物理学和信息科学的发展与交融，研究人员发现：以微观粒子作为信息的载体，利用量子技术，可以解决许多传统信息理论无法处理或是难以处理的问题。“量子密码”的概念就是在这种背景下提出的。当前，量子密码研究的核心内容，就是如何利用量子技术在量子信道上安全可靠地分配密钥。

相对应。唯一需要注意的是，对这些点的具有物理存在意义的陈述，只局限于对质点间相遇时的描述。用数学的方法来阐述，就是两条代表了点的运动线各有特殊的坐标值x_1、x_2、x_3、x_4是公有的。经过充分考虑后，读者无疑会承认，这实际性的时间—空间性质是构成我们物理陈述中唯一的真实证据。

当我们描述相对于参考物体的质点的运动时，其主要着眼点在于该点与参考物体上的各个特定点的相遇。我们同样也可以通过观测时钟的指针和指针盘上特定的点来确定相应的时间值。对这一道理稍加考虑，就会明白，这与用量杆进行空间测量时的情况完全一样。

下面的陈述一般都是有效的：每一个物理描述可分成本身的多个陈述，每一个陈述都与A、B两事件在空间—时间上相重合。高斯坐标对这一个陈述的表达是：两事件的四个坐标x_1、x_2、x_3、x_4是相符合的。因此高斯坐标对时空连续区的描述就不会有必须借助一个参考物体的描述方式的缺点，这种描述方式不必因所描述的连续区是否具有欧几里得的特性而有所限制。



探测器顶部　合成图片

迄今，各种宇宙探测器已先后对月球、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星、哈雷彗星，以及许多小行星和卫星进行了距离或实地考察，获得了丰硕的成果。像金星终日蒙上的一层密雾浓云及温暖世界，火星上的所谓人工运河和生命存在之谜，土星的奇异光环和卫星家族，最大的木星及其极光景观等，通过探测器的探访，大都陆续寻觅到了答案，而且不断获得新的发现，在人们面前展现出一幅崭新的太阳系面貌。



斯坦福大学　摄影

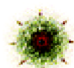
斯坦福大学位于富庶的加利福尼亚州，与美国文化底蕴深厚的旧金山和有“高科技圣地”之称的硅谷为邻，地理环境可说是得天独厚。



2.11 广义相对性原理的精确表述

现在，对我们本章第一节中的广义相对性原理的暂时性表达，已经可以用更严格的表述来加以代替。本章第一节中的“所有的参考物体 K、K_1，无论其运动状态如何，对于描述自然现象（作简洁陈述的自然现象）都是等效的”是不成立的。因为使用刚性参考物体作空间—时间描述，除非用高斯坐标系来代替参考物体，否则在狭义相对论所推出的方法中是不可能的。下面的陈述符合广义相对性原理的基本观念：“所有的高斯坐标系本质上的简洁陈述与普遍的自然界定律是相等的。”

除此以外，我们还有另一种比狭义相对性原理的自然推广更使人明白易懂的形式来陈述广义相对性原理。根据狭义相对论，表述普遍的自



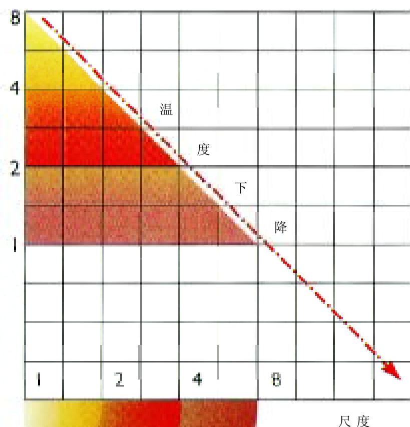
附：

广义相对论

1916 年，爱因斯坦建立了广义相对论。也就是将仅适用于惯性系的狭义相对论推广到适用于任意参考系，且包括引力，阐明时间、空间性质与物质分布及运动之间相互依赖关系的相对性理论。

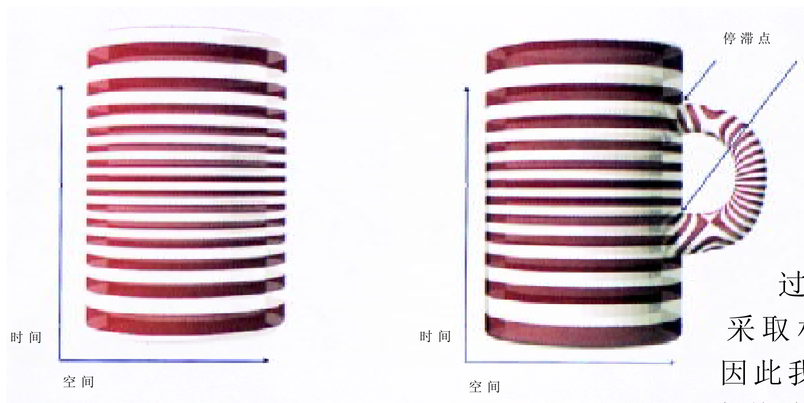
它有两个基本假设：第一，广义相对性原理，即自然定律在任何参考系中都具有相同的数学形式。第二，等效原理，即在一个小体积范围内的万有引力和某一加速系统中的惯性力相互等效。

按照上述原理，万有引力的产生是由于物质的存在和一定的分布状况使时间空间性质变得不均匀（所谓时空弯曲）所致，并由此建立了引力场理论。而狭义相对论则是广义相对论在引力场很弱时的特殊情况。从广义相对论可以导出一些重要结论，如水星近日点的旋进规律，光线在引力场中发生弯曲，较强的引力场中时钟较



宇宙的尺度与温度坐标　示意图

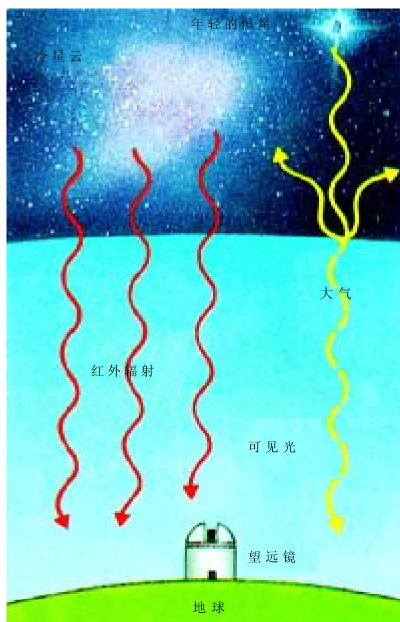
在弗利德曼模型中，人们发现当宇宙膨胀时，其中的任何物体或辐射都变得更凉，尤其是当宇宙的尺度大到两倍的时候，宇宙的温度就会降低一半。



时间空间坐标

宇宙历史在时间和空间存在着其一个停滞点。

然界定律的方程即使经过变换后，仍将采取相同的形式。因此我们在洛伦兹变换中以新参考物体K的空间—时间变量x_1、y_1、z_1、t_1取代一个参考物体K_1（伽利略）的空间—时间变量x、y、z、t。另一方面，按照广义相对论，任意替代的高斯变量x_1、x_2、x_3、x_4，经变换后形式仍然相同，因为每一种变换（不仅



红外线照相术　示意图

由于大部分的可见光会被反射，来自太空中远处天体的红外线辐射比较容易穿透地球的大气层，天文学家可利用红外线照相术观测这些天体，以弥补人类眼睛仅能看到可见光的不足，这就是红外线照相术存在的最重要理由。

慢（或引力场中光谱线向红端移动）等。这些结论和后来的观测结果基本上相符。特别是，通过测量雷达波在太阳引力场中往返传播在时间上的延迟，以更高的精度证实了广义相对论的结论。但其中还有很多问题有待研究。

广义相对论漫谈

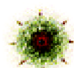
狭义相对论将力学和电磁学统一起来，将时间和空间统一起来，带来了时空观念的根本变革。在狭义相对论中，速度只具有相对的意义，所有的惯性系都是平权的，没有哪一个惯性系更优越，从而排除了惯性系的绝对运动；另一方面，物理作用传播的极限速度是真空中的光速，从而在整个物理学中排除了超距作用观念。正是这两方面，狭义相对论尚存在理论上的疑难，有待于进一步发展。其一，引力现象是物理学研究的广泛课题，而牛顿万有引力定律的表述是超距作用的，它与狭义相对论相抵触，狭义相对论不能处理涉及引力的问题，需

是洛伦兹变换）都是从一个高斯坐标系转换到另一个高斯坐标系。

如果我们愿意坚持我们“旧时间”的三维观点，就可以归结广义相对论基本观念发展的特点如下：广义相对论和伽利略区域及没有引力场存在的区域相关。就此而论，一个伽利略参考物体充当着一个其运动状态是“孤立”的刚性参考物体，它相对于质点做匀速直线运动的伽利略定律是成立的。

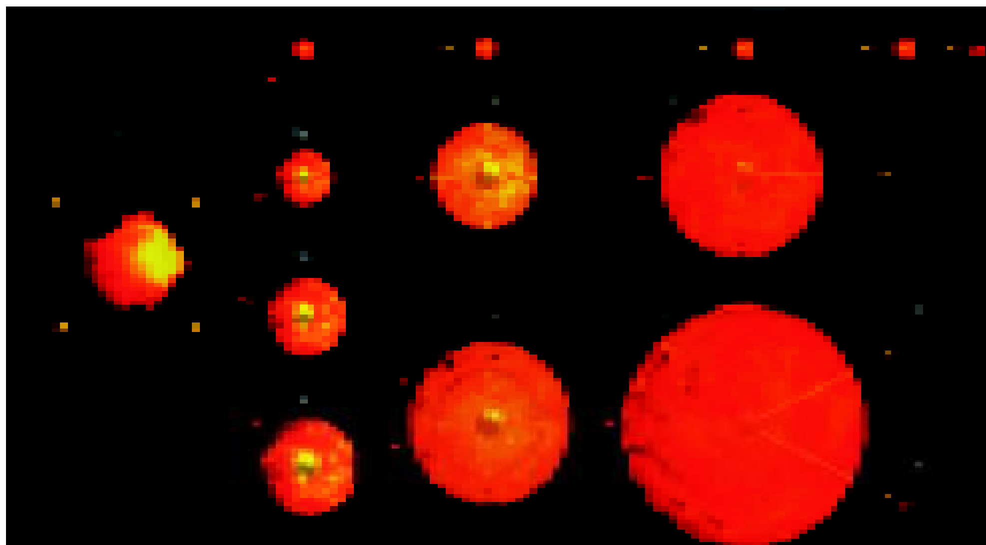
从某些考虑来看，同样的伽利略区域似乎也应该引入非伽利略参考物体，而相对于这些物体，便存在有一种特殊的引力场（见本章第三节和第六节）。

这个引力场并没有具有类似于欧几里得性质的刚体参考物体，因此在广义相对论中，假设的刚性参考物体是无用的。钟的运动受引力场的影响，因此，关于时间的物理定义借助于钟的运动的话，就不可能达到狭义相对论中类似运动的真实感。



要将它纳入而发展相对论的引力论；其二，狭义相对论在否定绝对运动上还不够彻底，它否定了一个绝对静止的惯性系，但却肯定了所有惯性系比起其他参考系更优越的地位，而且在究竟什么是惯性系的问题上还存在逻辑循环。结果造成了已知物理定律却不知此定律赖以成立的参考系的尴尬局面，整个物理学犹如建筑在沙滩上。

爱因斯坦思考了这些问题，把狭义相对论发展为广义相对论。其突破口是16世

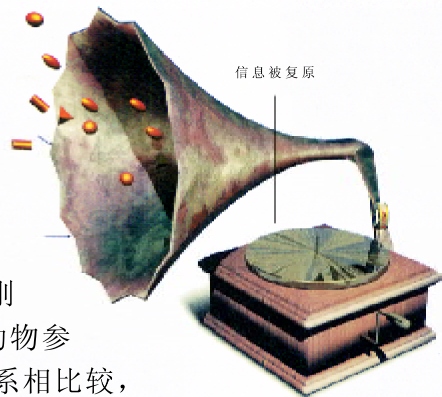


恒星的发展　示意图

如果一个恒星的质量比强德拉塞卡极限还小，它最终会成为褐矮星或白矮星。如果它超过这个极限，该超巨星的最后引力坍缩会产生一个中子星或黑洞。

基于上述缘故，非刚性参考物体，就其整个说来它的运动是任意且可以发生任何改变的。钟的运动是对时间定义的测定，因而其运动并不一定要遵从或规则或不规则的运动定律。我们想象每一个这样的钟固定在非刚性参考物体上的某一点，毗邻的钟（空间中）同时观测到的“读数”的差是一个无穷小量，这个大体上相当于一个任意选定的高斯四维坐标的，非刚性参考物体可以被适当地称做“软体动物参考物”。这个“软体动物”与高斯坐标系相比较，

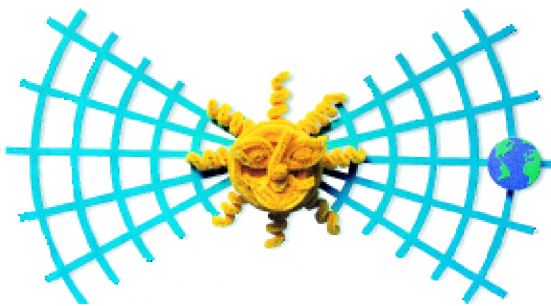




扩散　合成图片

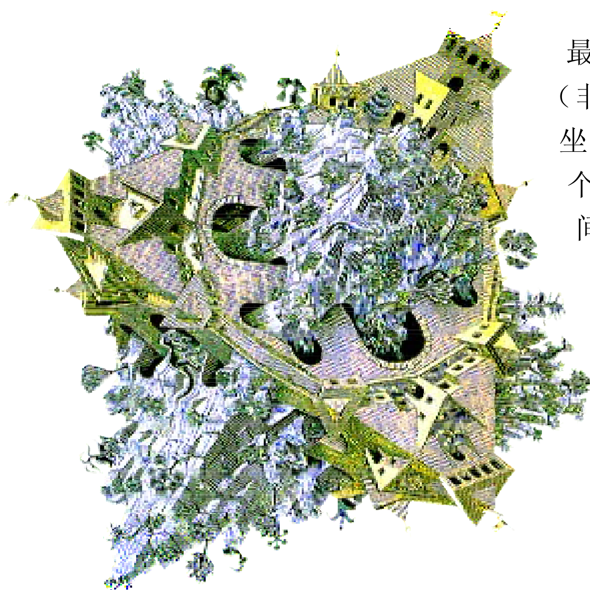
由于粒子(原子、分子或分子集团)的热运动自发地产生物质迁移现象叫“扩散”。扩散可以在同一物质的固、液态之中。

纪伽利略已经知道但长期不能解释且未加重视的事实：物体的重力加速度为恒量，它是物体的引力质量和惯性质量相等的结果，以后又被厄缶实验等精确证实。爱因斯坦从这一事实引出引力场与惯性力场等效的等效原理。根据等效原理，物体在无引力的非惯性系中的运动与它在存在引力的惯性系中的运动等效，惯性系与非惯性系没有原则的区别，它们都同样地可用来描述物体的运动，没有哪一个更优越。爱因斯坦将狭义相对性原理推广为广义相对性原理：一切参考系都是平权的，物理定律应该在广义的时空坐标变换下形式不变。它是广义相对论的另一条基本原理。另一方面，引力作用可以用加速系来抵消，在这一加速系中引力作用不复存在，例如在重力场中自由下落的参考系中，物体因“失重”而消除了重力。广义相对论把这一自由下落的参考系称为局部惯性系。于是前述惯性系概念上的逻辑循环不复存在，而且在此局部落体系中的物理定律就是狭义相对论的物理定律。知道了局部惯性系内的物理定律，可通过广义的时空坐标变换获得任意参考系内的物理定律。



力线　合成图片

法拉第认为，太阳就像萦绕在蜘蛛网一样的力场中。如果地球突然进入这个网状力场，它立刻就能感觉到太阳的位置，因为它能“感受到”这个网状力场。



最易于理解之处在于形式上保留（非合理性的）了空间坐标和时间坐标的相互独立状态。我们假设这个软体动物的每一点都是一个空间点，相对于每一个空间点保持静止的每一质点就是静止的。如果把这个软体动物假设为参考物体，根据广义相对性原

上四面体小行星

埃舍尔　木版画　1954 年

这颗小行星是一个正四面体，呈现在我们眼前的是它的其中两个表面。埃舍尔在创作这幅作品的时候，在画与画的结合处画成直角，以反映四面体的棱线。



按照广义相对论，在局部惯性系内，不存在引力，一维时间和三维空间组成四维的欧几里得空间；在任意参考系内，存在引力，引力引起时空弯曲，因而时空是四维弯曲的非欧黎曼空间。爱因斯坦找到了物质分布影响时空几何的引力场方程。时间空间的弯曲结构取决于物质能量密度、动量密度在时间空间中的分布，而时间空间的弯曲结构又反过来决定物体的运动轨道。在引力不强、时间空间弯曲很小情况下，广义相对论的预言同牛顿万有引力定律和牛顿运动定律的预言趋于一致；而引力较强、时间空间弯曲较大的情况下，两者有区别。广义相对论提出以来，预言了水星近日点的反常进动、光频引力红移、光线引力偏折以及雷达回波延迟，都被天文观测或实验所证实。近年来，关于脉冲双星的观测也提供了有关广义相对论预言存在引力波的有力证据。

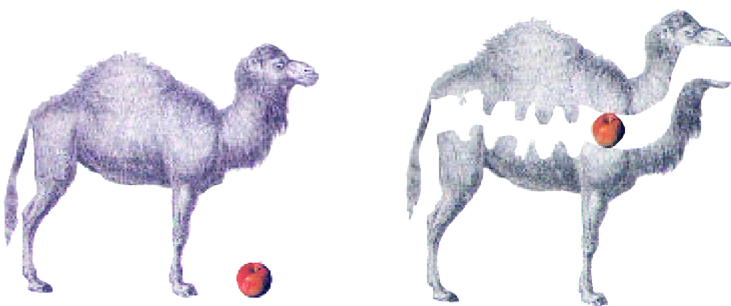
卫星探测　合成图片



广义相对论由于它被令人惊叹地证实以及其理论上的完美，很快得到人们的承认和赞赏。然而由于牛顿引力理论对于绝大部分引力现象已经足够精确，广义相

可能与不可能　合成图片

由于不确定性原理的存在，宇宙中的一些事件都存在着其可能性与不可能性。



理，所有的软体动物都可是表述普遍自然界定律的参考物体，并且拥有同等的权利及相同的结果，而这些定律本身必须相对于软体动物的选择而独立。

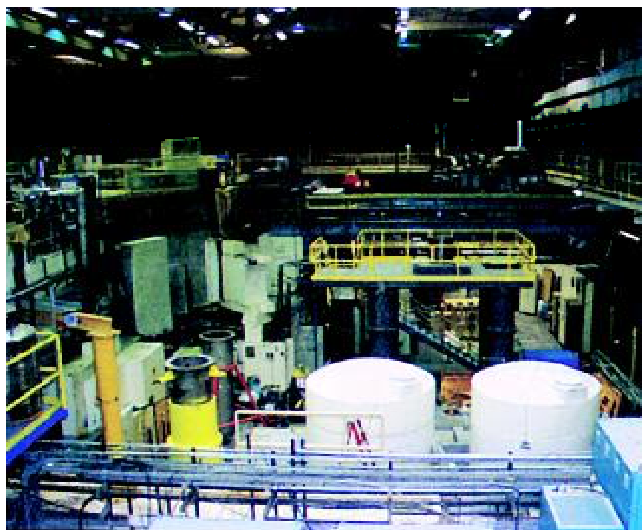
由这些情况可以看出，广义相对性原理所具有的巨大威力就在于它对自然界定律作了一些广泛而具明确性的限制。

对论只提供了一个极小的修正，人们在实用上并不需要它，因此，广义相对论建立以后的半个世纪，并没有受到充分重视，也没有得到迅速发展。

到20世纪60年代，情况发生变化，发现强引力天体（中子星）和宇宙背景辐射，使广义相对论的研究蓬勃发展。广义相对论对于研究天体、宇宙的结构和演化具有重要意义。中子星的形成和结构、黑洞物理和黑洞探测、引力辐射理论和引力波探测、大爆炸宇宙学、量子引力以及大尺度时空的拓扑结构等问题的研究正在深入，广义相对论成为物理研究的重要理论基础。

洛斯阿拉莫斯实验室　摄影

洛斯阿拉莫斯国家实验室位于新墨西哥州洛斯阿拉莫斯城，是美国能源部拥有的一个科研机构。该组织在其新型 Avalon 超级计算机系统使用了3com 公司的千兆位以太网交换机。Avalon 是当今世界上功能最强大的计算机之一，允许科研人员快速而可靠地处理大量数据。洛斯阿拉莫斯实验室将利用 Avalon 计算机系统从事宇宙起源探索，以及全球气候对物质和武器技术的影响等科研活动。



2.12 以广义相对性原理为基础解决地心引力问题

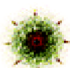


如果读者对于早先的问题已经全部理解，那么对于理解更深层次的万有引力就不会再有困难。

我们的考察从一个相对于伽利略参考物体 K 中没有引力场存

银河系　太空摄影

银河系有一个由星球和气体组成的晕圈。太阳也只是银河系中1 000亿颗恒星之一，银河系和其他漩涡星系一样，从球状中心伸展出一些弯曲、由星球组成的旋臂，它的直径是10万光年，太阳离它的中心是3万光年。



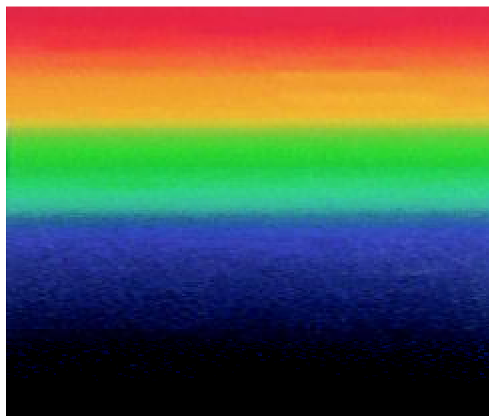
附：

广义相对论的诞生与证实

时空弯曲的程度，取决于宇宙中物质的分布情况：一个区域内的物质密度越大，时空的曲率也就越大。这样，太阳附近的时空就要比地球附近弯曲得利害，因为太阳的质量要大得多。用广义相对论来看宇宙，引力就不再同于经典力学中的概念，它已经被转化到时空的几何（曲率）中去了。爱因斯坦认为，引力产生于从狭义相对论的平直空间到广义相对论的弯曲空间的转换之中。

星系　合成图片

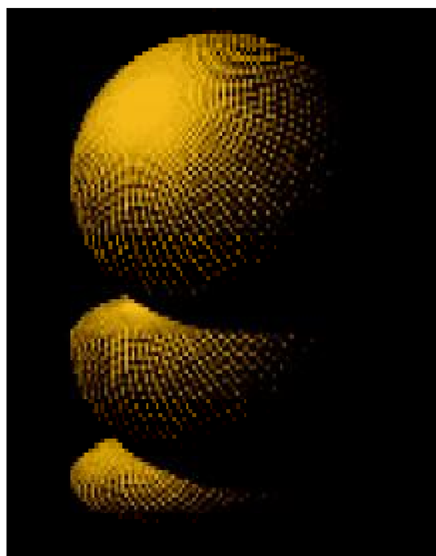
人们探索宇宙后，才知道太阳系是多么微不足道。宇宙中的各种星系团与超星系团，形成了巨大的宇宙。



这样，我们对一些日常事件的看法，比如，砸中牛顿脑袋的那只苹果砰然落地这样的事件，就从根本上改变了。引力不是一种经过空间作用在一段距离上的神秘的力，而是因为像地球这样的大质量物体，使空间和时间发生了畸变。我们把时空想象成一张平展的橡胶软垫，大质量的物体放上去，会使橡胶垫发生局部变形，

三只球　埃舍尔　版画　1945 年

这幅作品所要表达的是想在二维平面上表现三维空间的主题，自然科学透视法被发现以来，人们描摹自然的能力大大加强。三只球利用了球形镜面的反射原理。



在的一个区域开始。根据狭义相对论得出的量杆和钟相对于 K 以及“孤立”质点的行为都是已知的论述，其中，“孤立”质点沿直线做匀速运动。

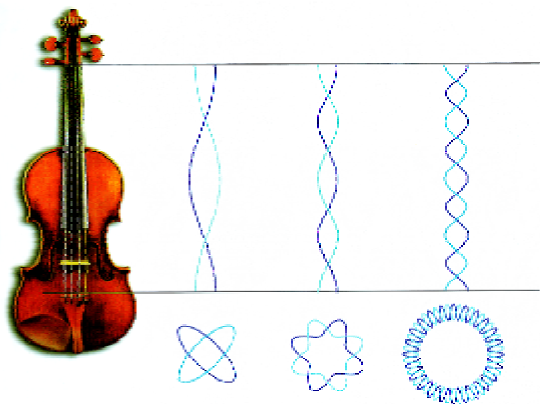
现在，让我们考察这个区域时将参照物任意选取为 K_1 中的一个高斯坐标系或者一个“软体动物”。与 K_1 相对的存在有一个引力场 G（特殊的种类），对于量杆、钟和自由运动的质点相对于 K_1 的

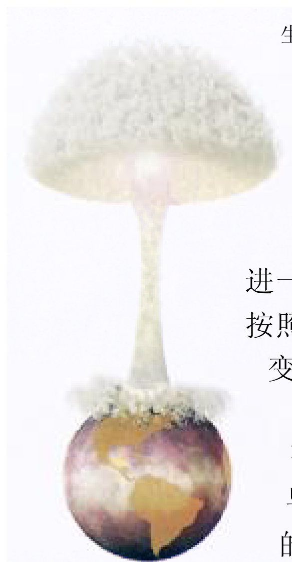
变形的程度决定于物体的质量。太阳在我们太阳系中，质量远大于其他任何行星，所以它使时空畸变得最厉害。行星可以用大小不等的球来代表，这些球在橡胶垫上围绕太阳滚动，球滚动的路径也就是行星的轨道，它们都位于太阳附近的深“阱”之中。从树上掉下来的苹果，不是被一个力拉向地球，而只不过是滚进地球所造成的局部时空的“阱”里面罢了。

物体在弯曲时空中的运动规律，一般不同于平直时空中的规律。一个不受引力的物体，在三维空间中是做匀速直线运动的。而在有引力的情况下，新的规律则是物体沿“测地线”运动。测地线基本上就是在弯曲的或平直的时空中连接任意两点的最短的路线，只要这两点充分接近。在速度非常小、物质密度也非常低的情况下，测地线运动就退化成牛顿描述的运动。显然，广义相对论的这种“退化”一定会发生，因为牛顿物理学所作的预言，在它所适

超弦理论　合成图片

超弦理论是现在最有希望将自然界的基本粒子和四种相互作用力统一起来的理论。超弦理论认为，弦是物质组成的最基本单元，所有的基本粒子如电子、光子、中微子和夸克都是弦的不同振动激发态。超弦理论第一次将 20 世纪的两大基础理论——广义相对论和量子力学——结合到一个数学上的框架里。超弦理论有可能解决一些长期困绕物理学家的世纪难题，如黑洞的本质和宇宙的起源。



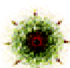


生命的起源　合成图片

广义而言，生命起源应当追溯到与生命有关的元素及化学分子的起源。因而生物圈演化的历程应当从宇宙形成之初，通过所谓“大爆炸”产生了碳、氢、氧、氮、硫、磷等构成生命的主要元素之时起。

行为，通过数学变换可以得知，这即是量杆、钟和自由运动质点在引力场G 影响下的行为，因此我们引进一个假设：引力场对量杆、钟和自由运动质点的影响将按照同样的定律继续发生，即使在当前的引力场中，坐标变换不能从伽利略特殊情况中简单地推导出来。

下一步是对引力场G 的空间—时间行为的研究，引力场G 源自于简单的坐标变换，由伽利略特殊情况导出。将这种行为阐明为一个定律，它总是始终有效的，而不必去管在这些描述中的参考物体（软体动物）



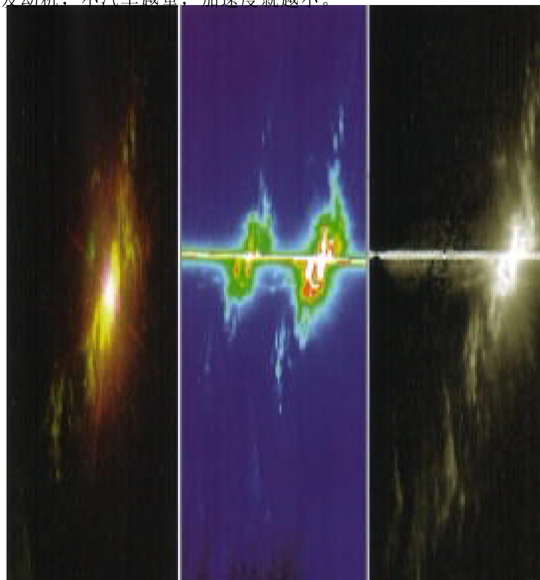
用的范围内是十分成功的，这我们在上一章中已经讲到过。然而，对于牛顿无法回答的一些问题，爱因斯坦却可以用测地线运动来解释。

1．　水星近日点的旋进规律。也就是有关水星——它是离太阳最近的行星——轨道的一个很小的细节。虽然爱因斯坦在推导相对论的时候，几乎没有考虑到这个问题，但它却成了对他的新理论的一次辉煌验证。按照牛顿力学，一个单独绕太阳运转的行星，它的轨道应当是一个精确的闭合椭圆，并且轨道的近日点也是固定的（近日点是行星轨道上离太阳最近的一点）。

但是，水星轨道的问题是，它的近日点不是固定的。其他行星的引力，加在一起使水星轨道受到一个很小的附加影响，它使得轨道产生进动，亦即近日点随着时间逐渐“前移”，在300万年内移动一周。但是，除了所有已知的引力影响外，还有一个完全解释不了的

加速度　合成图片

物体的加速度越大，则加在上面的力就越大。但是，加速度越小则被加速的物体的质量就越大。小汽车可提供一个熟知的例子，发动机的功率越大，则加速度越大，但是，对同样的发动机，小汽车越重，加速度就越小。



的种类如何选定。

然而这个定律并不是普遍的引力场定律，因为考虑中的引力场是一种特殊的引力场。为了找出普遍场的引力，我们依然需要将上面建立的定律加以推广，这能说明我们并非在胡思乱想，这一推广根据下列各项要求得出：

（A）所求的推广必须同样满足广义相对性假定。

（B）如果在所考虑的区域中有任何物质存在，仅有它的惯性质量是重要的，依照第一章第

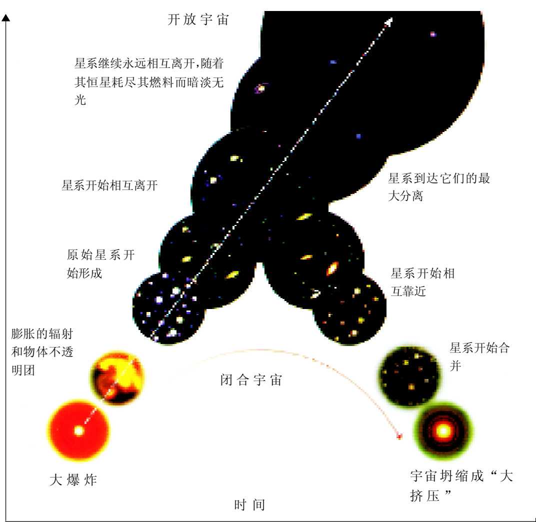


哈勃　摄影

现代宇宙学家哈勃站在施密特望远镜旁，在观测着太空。

附加进动——称为“异常进动”，根据天文学家们的观测，它仅仅是每世纪43″。在爱因斯坦以前，这个异常进动被认为是由一颗未被发现的行星引起的。但是爱因斯坦用广义相对论产生的时空曲率，算出了这个附加的进动值，正好是每世纪43″。近来，其他一些行星的这种近日点“异常”进动也被测量出了。在观测误差范围之内，它们的值也同样与广义相对论算出的值相吻合。

2. 光线在引力场中发生弯曲。这是爱因斯坦在完成广义相对论之前就曾预期的一个效应。从狭义相对论以及它的基本原理之一——光速对所有观测者都相同，不论他们的速度如何——可以得出一个推论，这就是能量和质量等效。这样一来，一束光的能量就对应着一定的质量，也就可以受到其他物质的引力作用。因此，在一个大质量天体的附近，例如在一颗恒星的附近，光线就会发生弯曲。以前，爱因斯坦也计算过遥远的星光在太阳附近发生的偏折角度，但当时他根据的是某种狭义相对论和广义相对论的混合方法，其中时空仍然假设是平直的。后来，他把



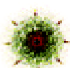
十五节，也仅有它的能量在一个激发的场中是重要的。

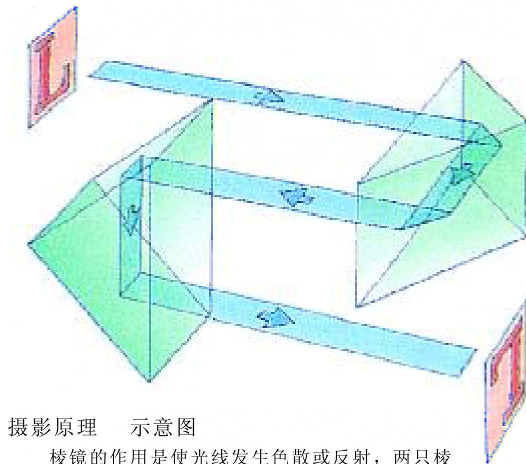
(C）引力场加上物质必须满足能量（和冲量[1]）守恒定律。

最后，广义相对性原理允许我们确定影响不存在的引力场的所有过程，可以根据存在的引力场的已知定律得出，这一过程是已经纳入狭义相对论范围的。关于这一点，我们继续下去的原则是按照已对量杆、钟和自由运动的质点解释过的方法进行。

引力论源自广义相对性公设的推导，它的优越之处不仅在于它的完美性，还在于消除本章第四节所显示的经典力学的令人不满意的方面和解释了惯性质量和引力质量相等的经验定律，并且它也解释了一个天文

[1] 冲量：力的时间累积效应的量度，是矢量。如果物体所受的力是大小和方向都不变的恒力 F，冲量 I 就是 F 和作用时间 t 的乘积。如果 F 的大小、方向是变动的，冲量 I 应用矢量积分运算。冲量通常用来求短暂过程（如撞击）中物体间的作用力，即由物体的动量增量和作用的时间来估算其作用力。此力又称冲力。冲量的单位和动量相同，在国际单位制中为千克·米/秒。





摄影原理　示意图

棱镜的作用是使光线发生色散或反射，两只棱镜组合在一起的时候可以使物像转正，这就好似摄影成像的原理。

这重新计算了一遍，但是应用了时空的曲率。新的结果正好是原来结果的两倍。也就是说，是爱因斯坦让光线必须沿着弯曲时空中的测地线传播。

英国的爱丁顿帮助验证了爱因斯坦理论的第二个预言。当爱丁顿从中立国荷兰的德西特那里第一次听到爱因斯坦在柏林的工作后，他不顾当时英国和德国已经处于交战状态而前往德国，冒着生命危险去验证这一理论。他是教友派的信徒，这个教派从道义上反对战争，因而他被准许免服兵役，条件是继续从事他的科学研究，特别是准备监测一次即将到来的日食。1919 年的这次日食，能够观测到星光从太阳近旁经过，因而可以测定光线是否发生了弯曲。在几内亚湾的普林西比岛，爱丁顿做了关于这次日食的最好记录——他验证了爱因斯坦的第二个预言。

从普林西比回来，爱丁顿在皇家天文学会的一次聚餐会上，模仿奥玛·哈央姆的诗体，即席朗诵道：

噢，把我们的测量留给智者去评判，

学的观测结果，这是经典力学无能为力的。

如果我们认为引力论中的引力场相当薄弱，而且“场”内相对于坐标系运动的所有质量的速度与光速比较都相当小，那么，我们就第一次获得近似于牛顿的引力理论，因而后面理论的获得就不需要任何特别的假定。尽管牛顿当时引进了相互吸引的质点间的吸引力必须与质点间的距离的平方成反比这一假设，但如果我们提高计算的精确度，那么偏差



探测宇宙　合成图片

人类通过向太空发射无线电信号来证实外星人的存在。

但至少有一件事已经搞清——光是有重量的；

尽管其余的事还在争论，有一件事已毫无疑问——

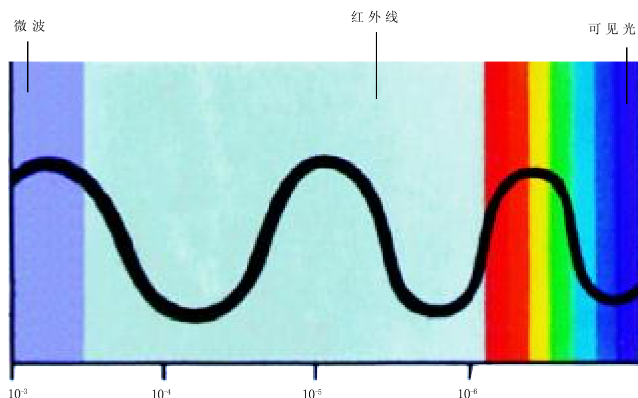
光线靠近太阳的时候，并不是直线前进！

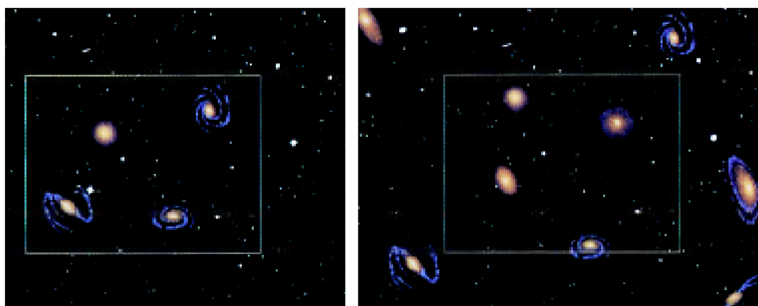
晚年，爱丁顿把这次对于广义相对论的验证，看做是他一生中最伟大的时期。他的这个观测，也使爱因斯坦一下子在国际上赢得了声望。

近些年来的对于广义相对论的验证，是对“双脉冲星”进行的研究。双脉冲星被认为是靠得非常近的一对老年星的核，它们都已坍缩得很小。叫它们脉冲星，是因为它们发射出很规则的射电波脉冲。这一对星互相围绕对方作极高速的转动，这样就必须用广义相对论来描述，而不是牛顿力学。它们的“近星点”的进动，要比水星和其他行星大得多。时空曲率的扰动，也已经用爱因斯坦的方程计算出来，由此可以预言，会有引力辐射从这对星发出，因而它们的轨道就会越来越小。此外，遥远的“类星体”

红外线辐射　示意图

红外线辐射通常称为热辐射，是一种类似光线的电磁辐射，红外线辐射在电磁光谱里接近可见光，红外线的波长比可见光长，但是比微波短。



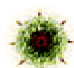


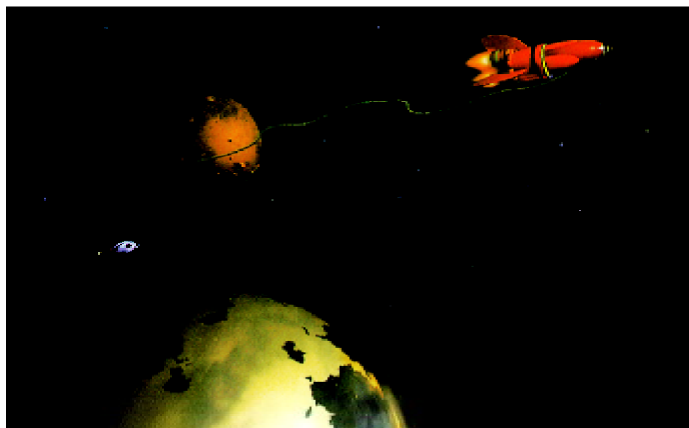
星系　合成图片

持宇宙不变论的英国天文学家假设有新的星系的产生，使星系间的距离不改变。如果他不这样假设，那么在一个膨胀中的宇宙，密度是不可能恒定的。

就在牛顿理论下表现出来，这实际上都是观测所察觉不出来的必然的微小偏差。

在这里，我们必须提醒读者注意这些偏差。按照牛顿理论，行星沿椭圆形轨道围绕太阳运行，如果对恒星本身的运动以及对其他行星的作用忽略不计，那么这个椭圆形轨道相对于恒星的位置将永远保持不变。





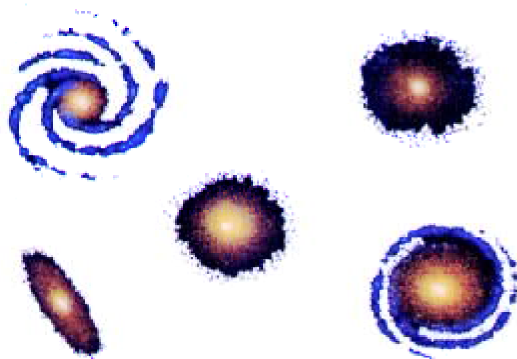
拖引黑洞　合成图片

黑洞的质量和一座山差不多，却被压缩成万亿分之一英寸，亦即比一个原子核的尺度还小。如果在地球表面存在一个黑洞，我们无法阻止它透过地面落到地球的中心，它会穿过地球而来回振动，直到最后停在地球的中心。所以仅有的放置黑洞的地方是围绕地球转动的轨道，而仅有的将其放到轨道的办法是用一个大质量的吸引力在前面拖引。

——宇宙中最亮的天体——发射出的电磁辐射，有时候会受到一种引力透镜的作用，这种作用是位于类星体和我们之间的某些星系引起的：每一个星系的引力场就像一种特殊的透镜，结果在我们地球上的望远镜看来，就产生了多重像，也就是原来的一个类星体变成为好几个。

总的说来，广义相对论要求从根本上更新时间和空间的概念，这个要求不是出于人为的意图，而是出于实际需要。这种更新了的时间和空间的概念，在数学上被具体化为单一的时空结构。这一时空结构决定于物质的分布，引力本身也不再明显地存在。无论如何，这是一种处理引力问题的方法。为了使读者不至于对此感到过于枯燥，我们想在此引用

因此，如果我们能够正确地观测校正行星的运动，并且假如牛顿的理论是完全正确的话，那么一个相对于恒星系的固定不移的椭圆形轨道就是我们所得到的行星轨道。这个推论除离太阳最近的水星外，已经通过所有其他的行星得到了证实，而且其精确度是目前所可能的灵敏的观测所能达到的最高精度。自勒威耶时起，人们就知道，椭圆符合水星的轨道运动，经过对上述提及的影响的校正后，相对于恒星系并不是固定不移的，而是非常缓慢地顺沿轨道的运动方向在轨道的平面内旋转。轨道椭圆的这种转动值是每世纪43″，其数值差保证下会超过几秒。对这一



宇宙的扩张　合成图片

宇宙是不断膨胀的，图画中的星系，彼此间的间隔越来越远，这显示宇宙正在扩张。

相对论专家威廉斯教授1924年写的一首诗，它是模仿路易斯·卡洛斯《海象和木匠》的诗体而作的，诗的题目叫做《爱因斯坦和爱丁顿》：

“是时候了”，爱丁顿说道，

“我们有很多事情要谈及，

像立方体、钟表和米尺，

以及为什么摆锤会摆动，

空间在多大程度上偏离沿直，

还有，时间是不是具有双翅。”

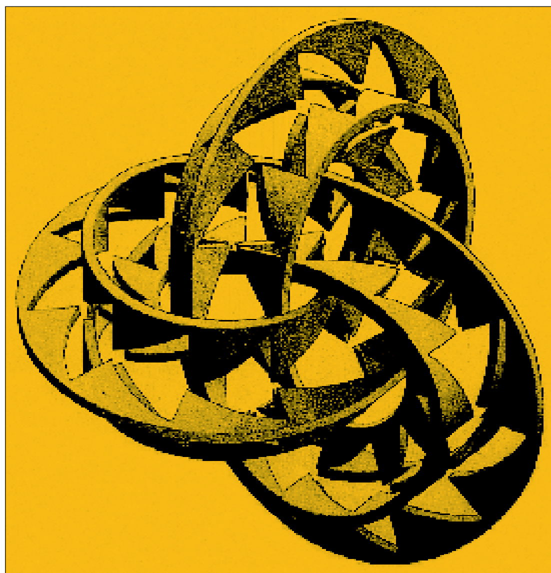
“你说时间变扭了，

甚至光线也被弯曲；

我想给我的印象是，

如果它是你的原意：

邮递员今天送来的信件，



结　埃舍尔　铅笔和有色粉笔　1965年

埃舍尔的数学兴趣在这件作品中表现得尤为突出，除了数学家，普通人很难对这个结构产生兴趣，它被称为“三叶纽结”，是最简单的纽结形式。所有的纽结都是针对三维空间曲线，在二维平面上不可能打成一个真正的纽结，埃舍尔的做法是赋予这条曲线复杂的外形，然后在平面上用严格的透视法再现这个结构。

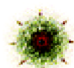
效应的解释，经典力学只能借助于引入一些不大可能成立的假定，这些假定的引入其目的仅仅是为了解释这个效应。

以广义相对论为基础，我们发现，每一个围绕太阳运行的行星的椭圆轨道都必然以上面指出的方式转动。除水星外，所有行星的这种转动都太小，以我们现在拥有的观测灵敏度是无法探测的，但就水星而言，该数值必须达到每世纪43″，这个严格的结果与观测相一致。

除此以外，从广义相对论中我们演绎出两个可被观测检验所证实的推论，即光线因太阳引力场而发生弯曲，以及来自星体的光谱线与在陆地上以类似方式产生的（也就是同一种原子）光谱线相比较，有位移[2]现象发生。这两个推论都已经得到证实。

---

[2] 位移：位移表示物体运动的物理量。它的大小等于起点到终点的距离，方向由起点指向终点。位移是矢量。



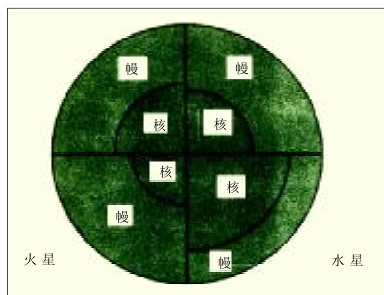


伽莫夫　摄影

乔治•伽莫夫（1904~1968年）是俄国著名的物理学家和天文学家。伽莫夫是一位兴趣广泛的天才。他早年在核物理研究中取得出色成绩，其后又在天体物理学上与勒梅特一起最早提出“大爆炸”理论。在生物学上首先得出“遗传密码”理论。他还是一位杰出的科普作家，在他一生正式出版的25部著作中，就有18部是科普作品。他的许多科普作品风靡全球，《物理世界奇遇记》更是他的代表作。由于他在普及科学知识方面所做出的杰出贡献，1956年，他荣获联合国教科文组织颁发的卡林伽科普奖，被科普界奉为一代宗师。

核与核幔　合成图片

地核又分为内地核与外地核两部分。地球内部越接近地心，温度越高，不过，地心点地面附近的温度梯度不能外推到几十千米深度以下。地下深处的传热机制是极其复杂的，由热传导的理论去估计地球内部的温度分布，常得不到可信的结果。



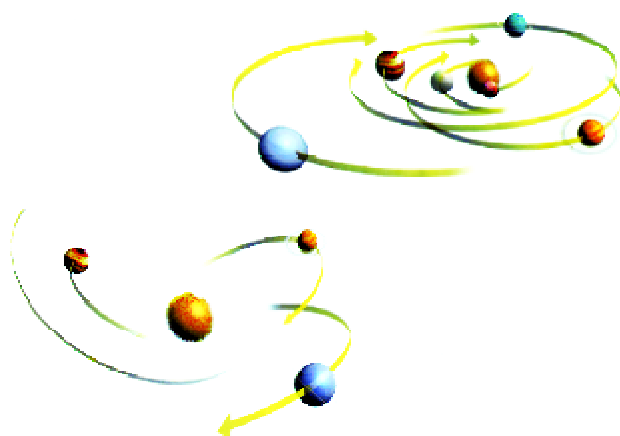
明天它就要被寄到邮局。”

“这最短的线，”爱因斯坦答道，
不再是那条直直的线，
它绕着自己弯来拐去，
好像一个‘8’字。
而且，如果你走得太快，
你将会到达得太迟。”

“复活节是在圣诞节期间，
非常遥远就是近了，
二加二也大于四，
还有，过了那里就是这里。”
“你也许是对的，”爱丁顿说，
“但是它看来的确有些稀奇。”

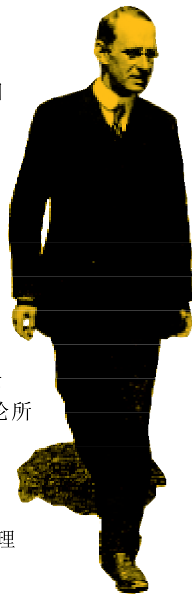
第三章

对整个宇宙的思考



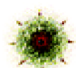
3.1　在宇宙论中牛顿理论的困难

除本章第四节所讨论的困难外，经典天体力学还存在另一个基本困难，就我所知，第一个对这个基本困难进行详细论述的是天文学家西利格。如果我们深思一下，对宇宙万物，对被视为整体的而言，我们应该持何种眼光来看待这一问题。那么我们的最初回答便一定会浮现于脑海中：就空间（和时



爱丁顿　摄影

根据爱因斯坦的广义相对论，引力是空间与时间弯曲的结果，这使光线在通过有质量的物体附近时发生弯曲。英国天体物理学家阿瑟·爱丁顿决定通过测量太阳引力对在1919年5月发生的一次日食中靠近太阳的恒星光线的影响来证实这一理论。爱因斯坦的理论所预测的弯曲效应是牛顿理论所预测的两倍，但它仍然十分微小。经过数月的分析，爱丁顿宣布，恒星表面位置的微小变化表明，爱因斯坦的理论已经击败了牛顿的理论。

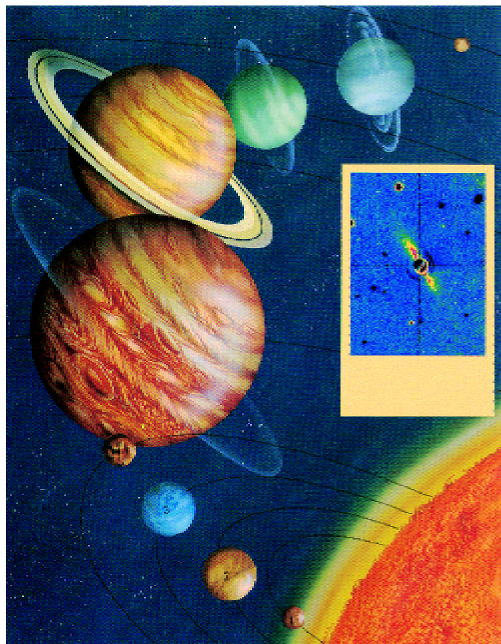


附：

为什么是爱因斯坦

已去世的几何大师陈省身曾经说过，一个数学家应当做好的数学，就是简洁易为人理解的、有开创性的、有发展的数学。这个概念也可以被推广到物理学领域中去。在谈及爱因斯坦1905年的成就时，芝加哥大学的宇宙学家迈克尔·特纳说，“爱因斯坦以一种公众能够理解的方式改变了物理学家对宇宙的看法”，这，就是好的物理学。

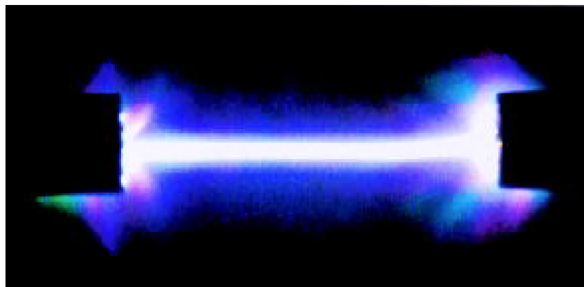
要摆脱那些符号化的表象探



太阳系　合成图片

太阳系是由受太阳引力约束的天体组成的系统，它的最大范围约可延伸到1 光年以外。太阳系的主要成员有：太阳（恒星）、八大行星（包括地球）、无数小行星、众多卫星（包括月亮），还有彗星、流星体以及大量尘埃物质和稀薄的气态物质。在太阳系中，太阳的质量占太阳系总质量的99.8%，其他天体的总和不到太阳的0.2%。太阳是中心天体，它的引力控制着整个太阳系，使其他天体绕太阳公转，太阳系中的八大行星（水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星）都在接近同一平面的近圆轨道上，朝同一方向绕太阳公转。

间）而言，宇宙是无限的。星体的存在无所不在，因此，就物质的密度来说，虽然细节的变量很小，但平均说来各处都是一样的。另外，我们无论在空间中的穿梭旅行多远，稀薄的恒星群在各处浮游移动，它们都具有同一的种类和密度。



宇宙最低温度　合成图片

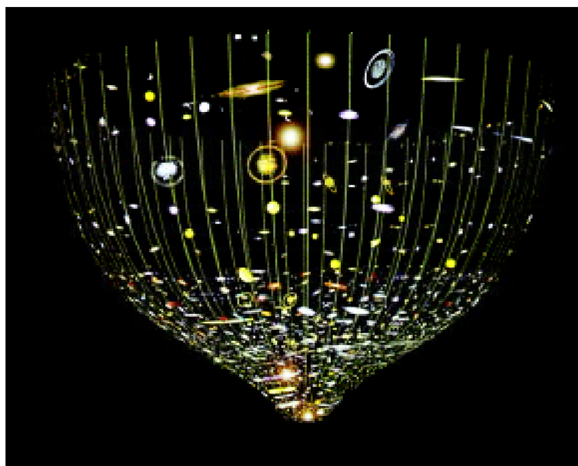
根据物理学原理我们知道，如果想要分子停止运动，需要非常低的温度。物理学家们在实验中设法使温度达到了零下272.59摄氏度，这是目前所知宇宙中的最低温度。

这个看法与牛顿的理论大相径庭。在牛顿的理论中，宇宙被要求具有某种中心，星群的密度以非常拥挤的形式聚在一起，从这个中心向外扩展，星群的群密度逐渐减小，直到在非常遥远的地方，成为一个空虚的无限区域。恒星宇宙应该

讨爱因斯坦的成就，无法回避的一个问题是：爱因斯坦和他的相对论，是如何影响了科学思维的？缺乏对这个问题的认识，所有流于细节琐事的分析，都将成为无本之木。

宇宙的膨胀　太空摄影

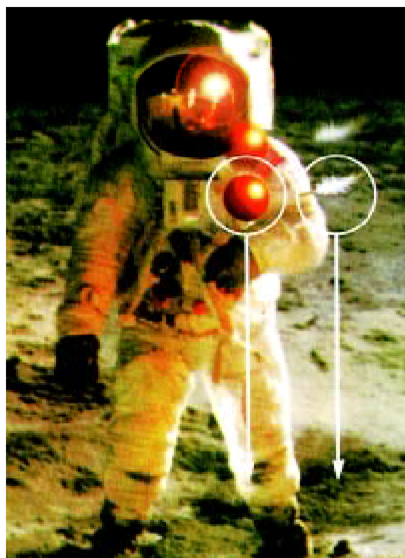
广义相对论彻底地改变了有关宇宙起源和命运的讨论。它使宇宙的膨胀理论日益得到证明。科学家们对宇宙的星系进行观测的成果都表明宇宙正在膨胀：几乎任何一对星系之间的距离都在增大。



故事要从“以太”说起。

19世纪末，物理学家们普遍认为，物理学的主要框架已经一劳永逸地构成了。此后的工作，只是把物理常数的测量弄得更准确一些，并把光以太结构的研究再推进一步。当时，人们仍然相信，宇宙空间中充满了亚里士多德命名为“以太”的连续介质，就像空气中的声波一样，光线和电磁信号是“以太”中的波。然而，1887年迈克尔逊－莫雷的实验却显示，光线看起来总是以同样的速度传播，这就与根据以太理论推导出的光速差别结论产生了矛盾。

荷兰物理学家洛伦兹这时候给出了他的解答，建立于以太真实存在基础上的洛伦兹变换方程。然而，26岁的爱因斯坦却大胆地摒弃了以太

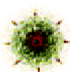


宇航员在月球　太空摄影

宇航员大卫·斯哥特在月球上进行了羽毛和铅球实验，由于月球上不存在空气的阻力因素，因此他发现羽毛和铅球以同样的速度下降。这个实验证明了不管物体的质量是多少，其速度增加的速率都是一样的。

是一个有限的岛屿处于无限的空间海洋中。

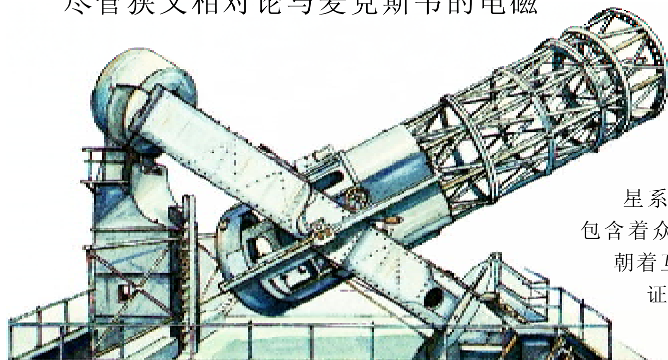
这个概念的本身非常难尽如人意。因为它导致了下述结果：恒星发出的光和恒星系中的各个单独的恒星不断向无限的空间奔涌，而且永不回返，永不继续与其他自然客体发生相互作用。这样一个有限的物质界一定会因逐渐而系统地削弱而进入穷尽。



这个经典权威的概念。他对洛伦兹变换方程进行了修正，并指出，因为无法探测相对于以太的运动，因此，以太的概念是多余的。这就对人们以往奉之为金科玉律的“同时性”概念提出了挑战。在爱因斯坦看来，每个人都有他自己的时间值，如果两个人是相对静止的，那么，他们的时间就是一致的。如果存在相互的运动，他们观测到的时间就是不同的。乘飞机一直向东飞行，叠加上地球旋转的速度，人们就有可能获得生命的延长，虽然可能只不过是零点几秒而已。

相对论的一个重要结果，便是质量与能量间的关系。爱因斯坦假定光速对所有的观测者都不变，如果持续给物体供应能量，被加速物体的质量就会增大。这种质量与能量的关系，便是著名的$E=mc^2$。当铀原子核裂变成两个小的原子核时，因为很微小的一点质量亏损，便会释放出巨大的能量。原子弹与核能的理论基础，便源出于此。

尽管狭义相对论与麦克斯韦的电磁理论结合得非常完美，

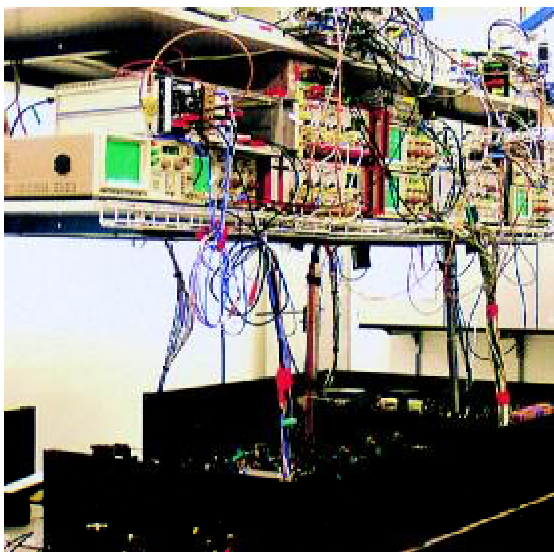


反射望远镜　摄影

美国天文学家埃德温·哈勃利用这台2.4米的反射望远镜发现银河只是宇宙许多星系中的一个星系，每一个星系都包含着众多的星球，同时，这些星系都朝着互相背离的方向运动。这一发现证明了宇宙膨胀理论的正确性，从而改变了人们对宇宙结构的看法。



为了避免出现这种进退两难的局面，西利格修正了牛顿定律。他假定，在很大的距离中，两质量之间的吸引力与平方反比定律相比，得出的减小的结果要快得多。于是，物质的平均密度不论是在极近处还是在极远处，处处一样便出现了可能，而无限大的引力场也就不会产生，也使我们摆脱了物质宇宙应该具有某种中心等诸如此类讨厌的概念的纠缠。当然，我们从这种基本

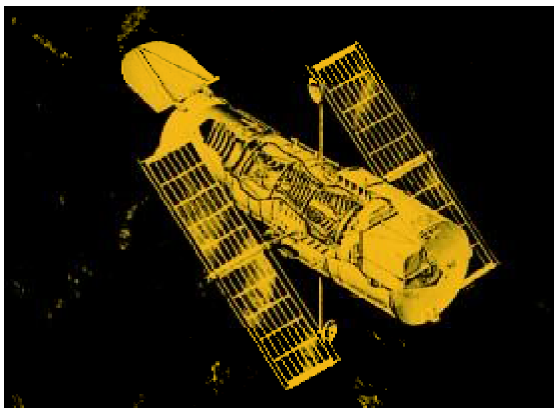


苏伊士实验室　摄影

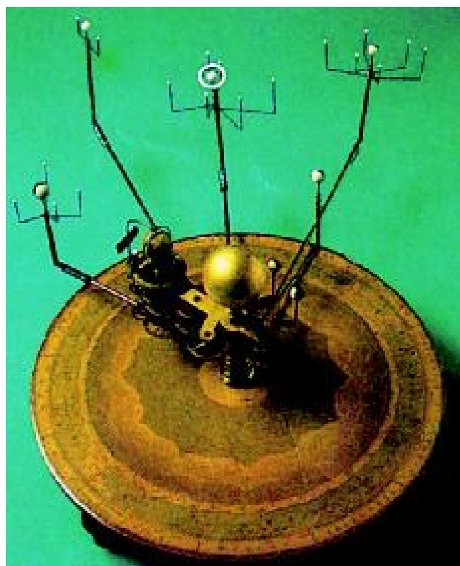
但它却与牛顿的重力理论不相容。几年后，爱因斯坦想到，如果质量和能量会造成四维空间（三维空间加上时间）的弯曲，那么，问题就迎刃而解了。这个关于弯曲时空的新理论，便是广义相对论。霍金曾评价道：“从公元前300年欧几里得完成他的《几何原本》后，这是一个人类感知他们存在于其中的宇宙的最大的革命性的更新……它彻底改变了人们对宇宙的起源及归宿的讨论方向。静止的宇宙可能永远存在……但根据广义相对论，宇宙大爆炸标志着宇宙的起源，时间的开始。从这个意义上说，爱因斯坦不仅仅是过去100年中最伟大的人物，他应该获得人们更长久的尊重。”

哈勃望远镜

哈勃望远镜长13.3米，直径4.3米，重11.6吨，造价近30亿美元，于1990年4月25日由美国航天飞机送上高590千米的太空轨道。哈勃望远镜以时速2.8万千米沿寂静的太空轨道运行，默默地窥探着太空的秘密。哈勃望远镜是有史以来最大、最精确的天文望远镜。它上面的广角行星相机可拍摄到几十到上百个恒星照片，其清晰度是地面天文望远镜的10倍以上，其观测能力等于从华盛顿看到1.6万千米外悉尼的一只萤火虫。



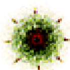
正是具备了这种科学属性的爱因斯坦，才可能在整个20世纪中成为妇孺皆知的科学新世界代言人，并一步步被神化。



困难中摆脱出来也付出了代价，那就是在既无经验根据亦无理论根据的情况下修改并复杂化了牛顿定律。这样的定律我们能够设想出无数个来，而且都可以实现其同样的目的。但我们没有任何根据说明为什么其中一个定律比任一其他定律更为可取，这些定律中的任意一个，并没像牛顿定律一样，即使很小的部分都建立在更为普遍的理论原则上。

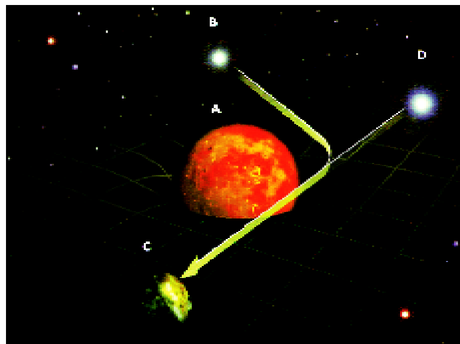
太阳系仪　合成图片

太阳系仪，一种显示行星绕日运动的机械装置，实际上就是一种机械模拟计算机。



恒星　合成图片

广义相对论理论预言由于太阳的质量的缘故，太阳近处的点的光锥会向内稍微偏折。这表明，从远处恒星发出的刚好通过太阳附近的光线会被折弯成很小的角度，对于地球上的观察者而言，这恒星显得是位于不同的位置。



谁是下一个？

会不会有下一个爱因斯坦？他是谁？他在哪儿？毫无疑问，在这个国际物理年中，这些问题会成为最常被提及的话题。

讨论两个名人之间的相似之处和不同点，是一件不太有建设性但却极为有趣的事。所以，才会有人对这样的比较乐此不疲：牛顿与伽利略、爱因斯坦与牛顿……甚至，一本最新出版的爱因斯坦传记的主题，是比较爱因斯坦与毕加索在创造性上的异同。在讨论 21 世纪谁将接过爱因斯坦的火炬，解决现今物理学界面临的危机时，史蒂芬·霍金成了一个经常被提及的参照系。

霍金说："在过去的 100 年中，世界经历了前所未有的变化。其原因并不在于政治，也不在于经济，而在于科学技术，直接源于先进的基础科学研究的科学技术。没有别的科学家能比爱因斯坦更代表这种科学的先进性。"有人认为，霍金在《时间简史》中分别为爱因斯坦、伽利略和牛顿立传，显示了他与三位科学巨人比肩的雄心。与其这样阴谋理论地妄加揣测，倒不如视其为一个当代理论物理学家对自身谦逊而恰如其分

地认识。媒体尽可为霍金冠上“活着的爱因斯坦”之类的帽子，但无论从哪个坐标系上，霍金与综合了科学天才、历史背景、个人魅力的爱因斯坦都是无法进行比较的。霍金一次开玩笑说：“他们需要的只是一个英雄，而从不关心我做过些什么。”

《纽约时报》曾经雄心勃勃地给出了一个未来爱因斯坦的任务清单。它们都是困扰现今物理学界的难题。如果联想到1900年希尔伯特提出的23个数学问题，此后是如何地影响了20世纪的数学发展方向，过分地追究这些问题从重要性和开拓性上是否足以同相对论媲美，并不是一种好的态度。

这些未来爱因斯坦任务清单中的问题包括：

上帝是否拥有选择？

宇宙的所有特性对于某种未知的法则而言，是否都是可预测的和不可避免的？

那些似乎可以加速宇宙膨胀并使星系越来越快地彼此分离的暗能量到底是什么？

为什么我们恰好生活在这个暗能量正要主宰宇宙演变的过程的时间点上？

这种推动力是否会永远继续下去，将所有的能量与生命吸出宇宙之外？

保持星系和星团聚拢的神秘引力胶——暗物质——又是什么？

四维空间足够了吗？

宇宙中是否还存在着另外的隐秘或微小维度？

大爆炸之前发生了什么？

时间和空间是自无形的永恒中出现的吗？

量子力学是否是事物的最终描述？

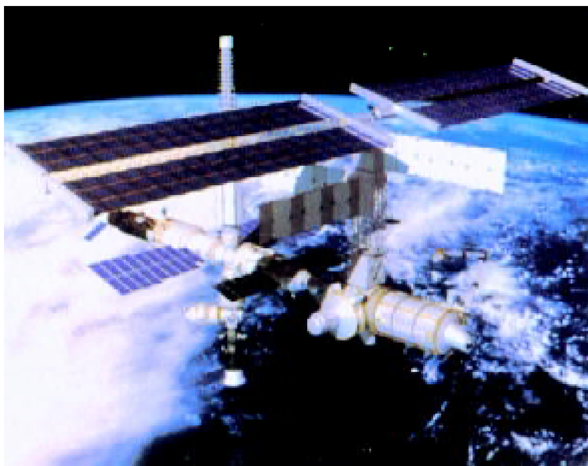
困扰爱因斯坦的EPR佯谬是否要被修改？

相对性是永恒的吗？

到底是否存在超光速？

人造卫星　摄影

人造卫星是个兴旺的家族，如果按用途分，它可分为三大类：科学卫星、技术试验卫星和应用卫星。科学卫星是用于科学探测和研究的卫星，主要包括空间物理探测卫星和天文卫星，用来研究高层大气、地球辐射带、地球磁层、宇宙线、太阳辐射等，并可以观测其他星体。技术试验卫星是进行新技术试验或为应用卫星进行试验的卫星。应用卫星是直接为人类服务的卫星，它的种类最多，数量最大，其中包括：通信卫星、气象卫星、侦察卫星、导航卫星、测地卫星、地球资源卫星、截击卫星等等。

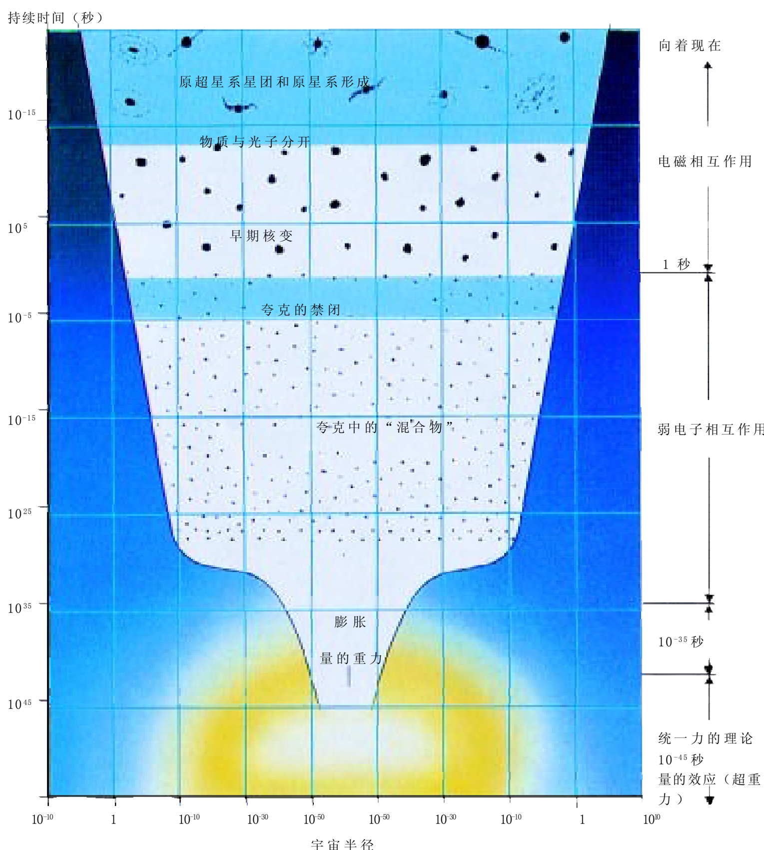




3.2 “有限”而“极大”的宇宙的可能

但是，宇宙构造的探索也同时沿着另一个完全不同的方向前进。非欧几里得几何学的发展使我们对整个宇宙空间的无限性表示怀疑，而非思维的规律与经验相冲突（黎曼、亥姆霍兹）。这一问题已由亥姆霍兹和庞加莱以无法超越的明晰性详细地论述过，我在这里仅仅只能略微谈到。

首先，我们设想存在于二维空间中。扁平的生物持有扁平的工具，特别是扁平的刚性量杆，自由地生活在除它们外没有任何东西存在的平面上。这个平面所包含的全部是它们观察到的自己的和一切扁平的“东西”。详细地说，例如欧几里得平面几何学中的一切建构都可以借助杆子来实现，也就是利用在本章第七节的网络结构构图法。扁平生物的宇宙与我们的宇宙相比较，是二维的。如同我们，它们的宇宙也向无限远处延伸，在那儿有足够的空间可以容纳无限多的互相等同的用杆子构成的正方形，它们宇宙的容积（表面）是无限的。如果这些生物说它们的宇宙是“平面”的，那么这一陈述由它们的认识得来，它们的意思是能用它们自己的



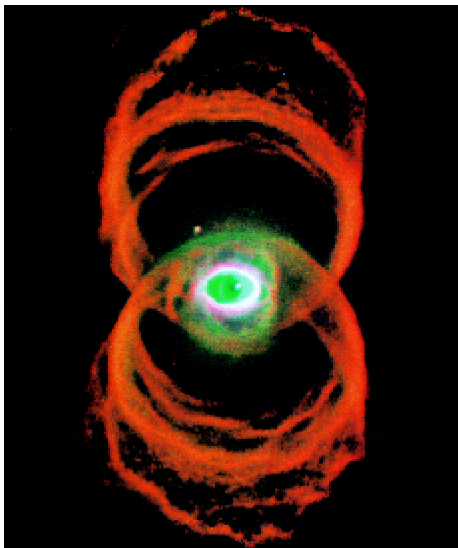
大爆炸后的宇宙熔化　合成图片

宇宙不是永远静止不变的，而且有一个开始或说一个起源。在1940年和1950年就导致“大爆炸”(Big Bang)的发展，说宇宙源起于一个高温高压的爆炸。这样就能够解释元素的由来和星球的形成和演化。

杆子在这个平面上按欧几里得平面几何学作图。这里的杆子与其本身所处的位置无关，而是永远代表了同一距离。

让我们考虑一下第二种二维存在，但是这次是用一个球面代替一个平面。这些扁平生物连同它们的量杆以及其他的物体，与这个球面紧密地结合并且不被许可离开，它们全部的宇宙及所能观察的范围仅仅能延伸到整个球面。这些生物能否注意到它们的几何学还是平面几何学吗？它们的杆子又是怎样来实现测量“距离”的呢？它们不可能这样做，因为如果它们企图尝试实现一根直线时，将会得到一根曲线。我们“三维生物”将指明这根曲线是一个大圆弧，其本身包含有明确有限的长度，本身就是符合标准，可以用量杆测定完整独立的线。同样地，这个宇宙拥有的有限的面积，能与用杆子建构的正方形相比较。这种思虑的极妙处在于，这些生物的宇宙是有限而又无界的论断得到了首肯。

但是，这些球体表面的生物不需要进行任何环球旅游便可以认识到，它们不是居住于一个欧几里得的宇宙。它们能在它们自己“世界”的任一部分都能弄清这一点，倘若它们使用的部分不是太小的话。从一点出发，它们绘制各个方向相等的“直线”（圆弧由三维空间判断）。它们将连接线的始端与自由端的线称作“圆”。根据欧几里得平面几何，圆的圆周与直径之比等于常数π，它与圆的直径大小无关。在球面上，我们的扁平生物会发现圆周与直径之比为以下的值：



宇宙弦　合成图片

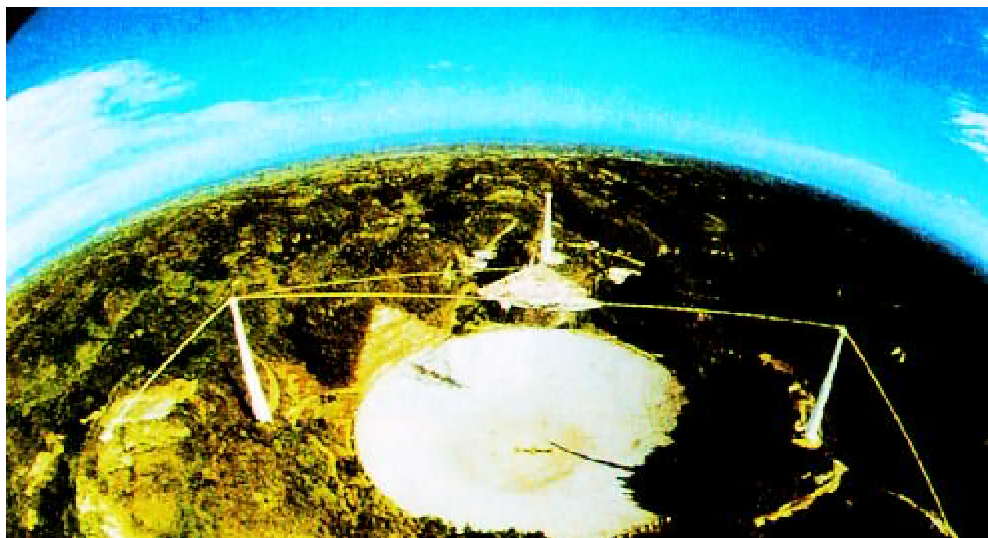
大爆炸理论是20世纪40年代由美国物理学家乔治·伽莫夫等人提出来的。它认为宇宙间所有的物质和能量原先曾经集中在一个时空点内，在100亿～200亿年前的某一时刻，原始火球由于某种原因而爆炸，我们的宇宙就诞生了，并且一直膨胀到目前的状态。但是，大爆炸宇宙模型并没有解决全部问题，例如它解释不了宇宙结构的不均匀性。这种模型要求整个宇宙的物质应当均匀分布，然而目前宇宙中的物质却不是这样，而是呈“团块”状结构，甚至包括星系、星系团。这样就不得不另想办法来解决这一矛盾。这正是天文物理学家想出宇宙弦理论的原因。

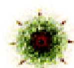


哥德尔

哥德尔的不完全性定理是现代最深刻的数学定理之一。对现代数学和物理影响深刻。





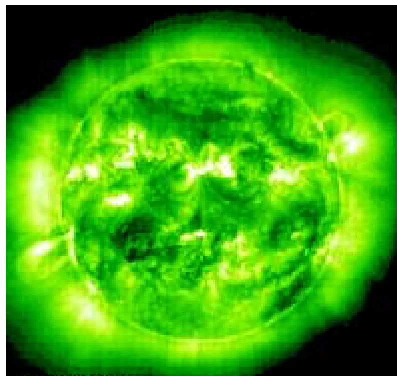


宇宙微波　合成图片

宇宙微波背景图是人类使用地面的或卫星的仪器绘制的全天的或局部的宇宙微波背景辐射的图。 自从1964年宇宙微波背景被发现后，地面上的微波仪器很长时间中无法发现这个背景辐射的不均匀性。但这只是因为当时地面上的仪器受到的干扰太大，仪器的精确度和分辨率太低。

黑洞　合成图片

黑洞，就是这样一种天体：它的引力场是如此之强，就连光也不能逃脱出来。根据广义相对论，引力场将使时空弯曲。当恒星的体积很大时，它的引力场对时空几乎没什么影响，从恒星表面上某一点发的光可以朝任何方向沿直线射出。而恒星的半径越小，它对周围的时空弯曲作用就越大，朝某些角度发出的光就将沿弯曲空间返回恒星表面。等恒星的半径小到一特定值（天文学上叫“史瓦西半径”）时，就连垂直表面发射的光都被捕获了。到这时，恒星就变成了黑洞。



$$\pi \frac{\operatorname{Sin} \frac{r}{R}}{\frac{r}{R}}$$

这是一个比π小的值。圆半径r与“世界球”半径R之比差异越大，上述比值与π之差就愈加可观。依靠这一关系，球面生物就能测定它们的宇宙（世界）的半径，即使当它们用来进行测量的区域仅仅是这个世界球的较小部分。但是如果这个部分确实非常之小，它们就证明不了它们居住在一个球面“世界”和欧几里得平面，因为同样微小的球面部分与相同的平面的差别是非常微小的。

因此，如果这些球面生物居住在一个其本身空间相对于宇宙空间来说小到可以忽略不计的行星上，那么它们就无法测定这一宇宙是有限还是无限的，因为这一“宇宙块”是它们所能接近的实际上的平面，或者说是欧几里得平面。由此可以直接推知，对于球面生物而言，圆半径的增大导致圆周的增大，直到达到“宇宙圆周”为止，其

后圆周随半径值进一步增大再逐渐减小，渐趋为零。在这一过程中，圆的面积越来越大，直到最后与整个“世界球”的总面积相等。

或许读者对为什么我们把“生物”放在一个球面而非另一种闭合曲面而感到很惊奇，但事实证明，这种选择具有它的合理性。在所有闭合曲面中，唯有球面具有曲面上所有的点都是等效的这一性质。我承认，一个圆的圆周 C 与它的半径值的比取决于 R，但对于给定的 R 值，这个比与“世界球”上所有的点都是一样的。换句话说，这个“世界球”是一个“等曲率曲面”。

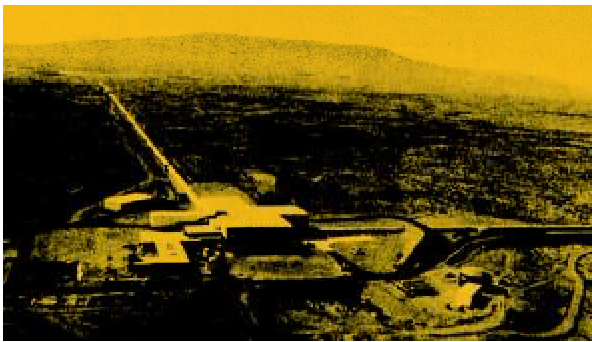


这是一个二维球面宇宙，在这里面我们有一个三维比拟，这就是黎曼发现的具有一个有限体积的，且空间各点同样相等的三维球面空间。我们问：由它的“半径”（$2\pi^2R^3$）能否确定一个球面空间呢？我们设想中的这个空间只不过意味着是我们想象中的“空间”经验的模型，在移动“刚性”体时我们能够体会到这种“空间”经验，在此基础上我们就能够设想出一个球面空间。

假设我们从一点向四面八方绘制直线或拉绳索，并且用量杆标记 r 来记取这些自由端点都位于一个球面上的具有长度的直线或绳索间的距离，该曲面的面积（F）能够凭借一个用量杆构成的正方形的特别方法测量出来。如果这个宇宙是欧几里得宇宙，那么 $F=4\pi r^2$；如果是球面的，那么 F 总是小于 $4\pi r^2$。随着 r 值的递增越来越大，F 值从零增大到一个由“世

激光干涉现象

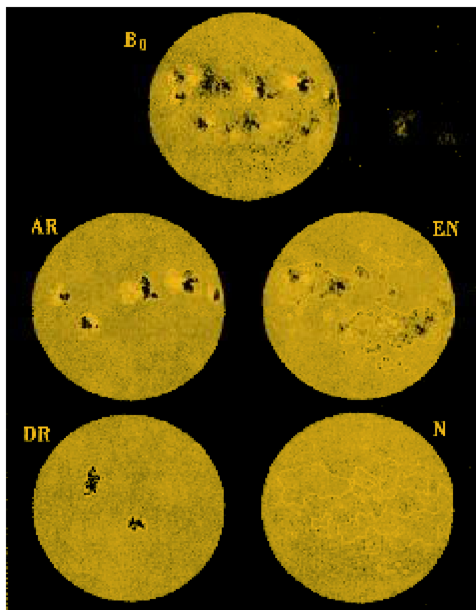
此图显示激光干涉仪引力天文台的一个观测站的外景，在华盛顿州的汉福德。经过的干涉波将激光的干涉图像产生小的位移。



斯图加特大学　摄影

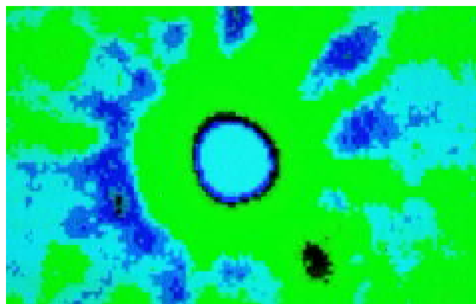
斯图加特大学是德国历史最悠久的技术大学之一，而且总是名列前茅。该校每年有5亿马克的预算及社会赞助的2.2亿马克科研经费，有14个英才中心，各种技术转化中心，四个研究生研究项目和第一个联邦超级计算机中心。





太阳磁场　合成图片

太阳的绝大部分物质是高温等离子体，太阳的物态、运动和演变都与磁场密切相关。太阳黑子、耀斑、日珥等活动现象，更是直接受磁场支配。因此，太阳磁场的研究具有重要意义。



3C273 类星体　合成图片

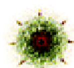
类星体：第一颗类星体 3C48 是荷兰科学家施米时在 1960 年发现的。第二颗类星体 3C273 是在 1963 年发现的，这两个天体在外貌上看起来都像是颗恒星，从红移值比星系都大看来，它们根本不可能是恒星。这种类似恒星而又不是恒星的天体就被称为“类星体”。

界半径”确定的最大值，但随着 r 的值的进一步增大，这个面积就会逐渐缩小到零。我们看到，相距越来越远的直线是从最初的始点辐射出去的，但后来它们又相互趋近，最终它们穿越了整个球面空间，在与始点相对立的“相反点”再次相会。由此不难看出，这个类似于二维球面的三维球面空间是有限的（体积有限）且又无界的。

我们还可以提到另一种弯曲空间，即“椭圆[1]空间”。这一“椭圆空间”可以看做是该空间两个“对立点”是同一的（彼此不可辨别的）的弯曲空间。所以，类似的椭圆宇宙我们可以在某种程度上把它当做一个具有中心对称的弯曲宇宙。

根据上面的论述可以得知，闭合的无界的空间是可能想象的。在这其中，球面空间（以及椭圆空间）的简单性胜过了其他空间，因为在其上的所有点都是同一的。这一想象对天文学家和物理学家提出了一个非常有趣的问题：我们所居住的宇宙，是无限的？或者像球面宇宙般是有限的呢？对这个问题，人类的经验远远不足以回答，但我们可以根据广义相对论所列举的确实的事实使这个问题能够在一定程度上得到解答。于是，上节所提到的困难就得到了解决。

[1] 椭圆：椭圆是二次平面曲线的一种，在直角坐标系内，可表示成 $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$。其中 a 和 b 分别是椭圆的长半轴和短半轴。在平面极坐标中，按照二次平面曲线的标准形式，当偏心率 $e<1$ 时，就是椭圆。



3.3 以广义相对论为依据的空间结构

根据广义相对论，空间的几何性质并不是独立自主的，它们由物质决定。因此，我们可以得出结论，宇宙几何结构的基础只有在根据已知物质状态的情况下才能作出判断。凭经验我们知道，对于一个合适的坐标系，行星的传播速度与光的传播速度相比较是很小的。因此，我们可以得出一个粗略的估计，在近似的程度上对宇宙的性质下一个结论，如果我们把物体视为静止的话。

从我们前面的讨论已经知道，量杆和钟的行为受引力场的影响，亦即受物质分布的影响。这一点本身就足以排除欧几里得几何学在我们的宇宙中严格有效的这种可能性，但是可以想象，我们的宇宙与一个欧几里得宇宙仅有微小的差别。而且计算表明，甚至像我们的太阳那样大的质量对于周围的空间的度规的影响也是极其微小的，因而上述看法就显得越发可靠。我们可以设想，就几何学而论，我们的宇宙的性质与这样的一个曲面相似，这个曲面在它的个别部分上是向下规则地弯曲的，但整个曲面没有什么地方与



早期望远镜　摄影

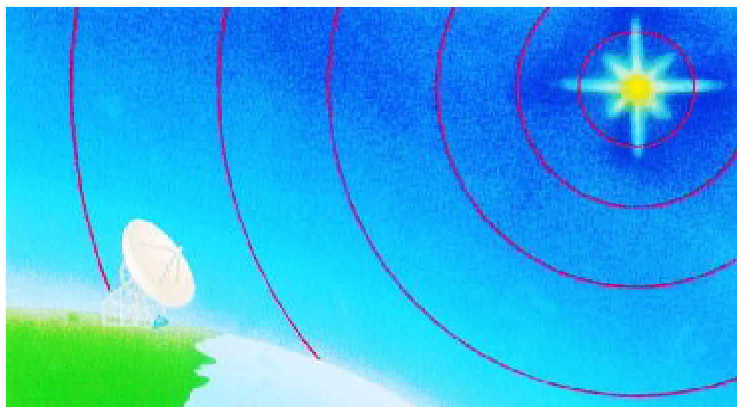
这一早期的望远镜，其放大倍数较小。

超新星遗迹　合成图片

超新星遗迹也是一类与弥漫星云性质完全不同的星云，它们是超新星爆发后抛出的气体形成的。与行星状星云一样，这类星云的体积也在膨胀之中，最后也趋于消散。





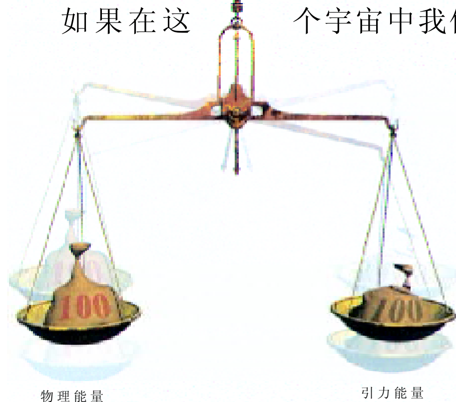


射电天文　合成图片

射电望远镜的原理与卫星电视天线接收器的原理大同小异，它通过接收来自遥远天体的电磁辐射信号，分析其强度、频谱和偏振来进行研究。其主要有两个基本指标——分辨率和灵敏度。从光学中，我们知道望远镜的分辨率与波长 λ 成正比，与望远镜的口径 D 成反比。由于光学望远镜是工作在波长为微米的数量级上，而射电望远镜工作在毫米数量级上，那么要达到同样的分辨率，射电望远镜的口径（孔径）就要比光学望远镜大一万倍。

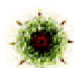
一个平面有显著的差别，就像是一个有细微波纹的湖面，这样的宇宙可以恰当地称为非欧几里得宇宙。就其空间衍育，这个宇宙是无限的。但是计算表明，在一个准欧几里得宇宙中物质的平均密度[1]必然要等于零。因此这样的宇宙不可能处处有物质存在。呈现在我们面前的将是我们在本章第一节中所描绘的那种不能令人满意的景象。

如果在这个宇宙中我们有一个不等于零的物质平均密度，那么，不论这个密度与零相差多么小，这个宇宙就不可能是准欧几里得的。相反，计算的结果表明，如果物质是均匀分布的，宇宙就必然是球形的（或椭圆的）。由于实际上物质的细微分布不是均匀的，因而实在的宇宙在其各个个别部分上会与球形有出入，亦即宇宙将是准球形的。但是这个宇宙必然是有限的。实际上这个理论向我们提供了宇宙的空间密度与宇宙的物质平均密度之间的简单关系。



物质能量与引力能量的平衡　合成图片

在宇宙的情形下，暴胀是非常有用的，其巨大的膨胀将早期宇宙中也许存在的坑坑洼洼全部抹平。随着宇宙膨胀，它从引力场借得能量去创造更多的物质。正的物质能量刚好和负的引力能量相互平衡，这样使总能量为零。



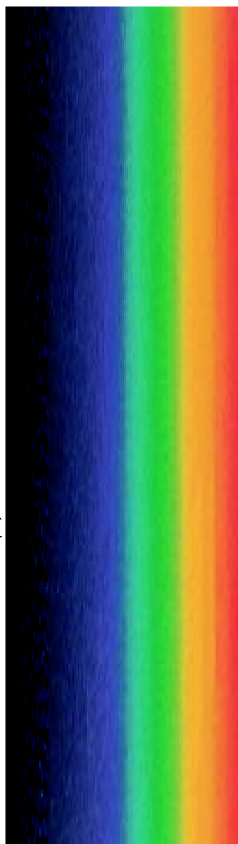
---

[1] 密度：物质每单位体积内的质量。物体中任一点 P 的密度定义为：

$$P=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta M}{\Delta V}$$

式中，ΔV 为包含 P 点的体积元；ΔM 为该体积元的质量。在厘米·克·秒制中，密度的单位为克／厘米^3；在国际单位制和中国法定计量单位中，密度的单位为千克／米^3。

3.4 对“以广义相对论为依据的空间结构”的补充





自从第一次出版这本小册子以来，我们对于未知的巨大的空间结构的认识（“宇宙论的问题”）已有了重要的发展，这一重要的发展在每一本提及到这一问题的通俗读物中都随处可见。

关于这个问题我最初的思考来源基于两个假设：

（1） 所有的物质都有一个平均存在于空间中的密度，该平均密度每一部分皆相同，而且不等于零。

（2 ）空间的大小（“半径”）与时间无关。

这两个假设在广义相对论中已被证明是一致的，但这两个假设条件只有在场[2]方程中加上一个假设项之后才能够被证明。这样的条件不是必须的，而且从理论的角度来看也不是自然的（“场方程的宇宙论”）理论。

（上）膨胀的气球 合成图片

膨胀的宇宙的状态就像一个正在被吹胀的气球，气球表面上的斑点会因膨胀而相互散开。但是，没有一个斑点是膨胀的中心。这和宇宙的膨胀原理是相通的。

假设（2）的出现是我当时所不可避免的。因为假设时，我以为，如果我们离开这一假设，就要陷入无休止的空想。



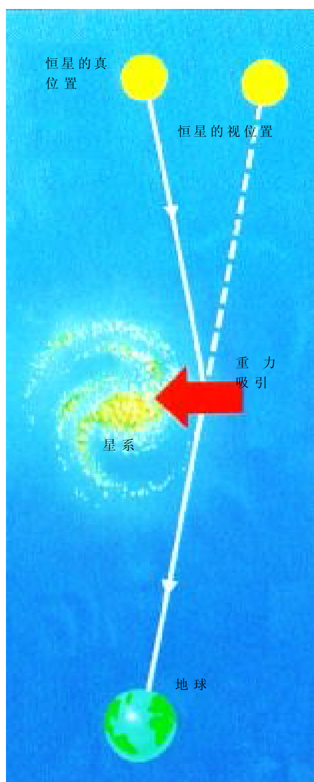
（下）DNA 分子结构 合成图片

DNA 是地球上所有生命的基础，它具有双螺旋结构，犹如螺旋状的楼梯，它是在1953 年剑桥的卡文迪许实验室由克里克和华特森发现的。

然而，早在上世纪20 年代，苏联数学家弗里德曼就已经证明，即使是在纯粹的理论观点中，依然存在有另一种不同的假设。他认识到，保留假设（1）的前提是无须在引力场方程中引入较小的宇宙条件，但必须得舍弃假设（2）。也就是最初的场方程容许有“世界半径”依赖时间（扩大的空间）的这样一个解。在此意义上我们能说，根据弗里德曼的观点，这个理论要求一个扩大的空间。

---

[2] 场：场是用来描述空间各点的某种物理现象的。它可以是物质场，例如引力场、电磁场等；也可以是某种物理量，如连续介质中的位移场、速度场、压力场等。在相对论量子力学发展以后，人们就用量子场来描述所有的微观对象。场的概念甚至可以用来描述凝聚态物理中的元激发。



重力场的作用力　　合成图片

一个强大的重力场可以将原本应该直行的光束弯曲。像星系一样重的物体所产生的重力吸引，可以将远方的恒星所发出的光线弯曲。因此，我们看到这颗星体在天空中的位置与其真位置将会有所不同。

几年以后哈勃发现，对河外星云[1]（“银河”）的特别研究证明，星云发出的光谱线有红移现象，星云间的距离越大，此红移则有规则地增大。就我们现有的知识来看哈勃的发现，我们可以根据多普勒原理把这一现象归结于太空中整个恒星系的膨胀运动。按照弗里德曼的假设，这是引力场方程所要求的。哈勃的发现，因此在某种程度上可以认为是这个理论的一个证实。

但是这里确实出现了一个前所未知的困难。如果哈勃将银河光谱线的位移解释为一种膨胀（从理论的观点这是没有问题的），那么，此种膨胀“仅仅”起源于约109亿年前。按照天文物理学的观点，独立的恒星和恒星系的发生和发展比这一时间漫长得多。如何克服这种矛盾，我们仍一无所知。

还需要提及的是，宇宙空间的膨胀理论，以及天文学的经验数据皆不能使我们对（三维）空间是有限或无限这一论断下过早的结论，而最初的“静态”假设空间则使宇宙空间倾向于闭合性（有限性）。

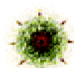


耶鲁大学　　摄影

耶鲁大学是世界上最早设立人文和艺术学科的大学之一，拥有众多一流的人文科学系和人文科学研究计划，其英语系和历史系排名位居全美大学之首，哲学的师资力量也相当雄厚，耶鲁的骄傲——惠特尼人文科学研究中心，使耶鲁成为美国高等教育界人文科学研究的高地。耶鲁特别强调自由的思想和自由的学术空气。这种“自由教育”的原则，使耶鲁能够包容各种思想流派，保持勃勃生机。

[1] 星云：星云就是散布在银河系内、太阳系外的一堆堆非恒星形状的尘埃和气体（星际物质），它们的主要成分是氢，其次是氦，还含有一定比例的金属元素和非金属元素。

最初所有在宇宙中的云雾状天体都被称做星云，后来随着天文望远镜的发展，人们的观测水平不断提高，才把原来的星云划分为星团、星系和星云三种类型。





附　录

广义相对论的实验证实

从系统理论观点来看，我们可以想象，经验科学的进展过程其实是一个连续的归纳过程。理论发展以特殊的简短形式陈述了大量完全根据个体观测到的结果的经验定律，再通过对这些定律的探知、比较，以此确定普遍定律。科学的发展与编辑分类目录相比具有雷同之处，它犹如一种纯粹的、完全根据经验的工作。



奇异吸引子

奇异吸引子是代表某种系统可能驻留的状态，不管某一部分放大多少倍，它基本上仍具有该吸引子的全盘结构，花纹里面有花纹，一直下去，永无休止，这个性质叫做“自相似”。

筹运方程图示

一个群体总数动力学的简单模型的操作表演。A 和 B：参数相同，放大率不同。C 和 D：不同参数，同一放大率。

但是这种观点绝不意味着包含了全部的实际过程，因为它忽视了严格、精确的科学过程中起重要作用的直观和演绎思考的发展作用。自然科学自诞生之日开始，理论的发展已不再仅仅是依靠进程安排来实现，引导者受经验数据的启发，而建立起一个比较系统的思想体系。一般而言，这个思想体系从逻辑上看是用少量基本假设，即公理，建立起来的。这一思想体系被我们称之为理论。大量的个别观察联系起来构成理论存在的理由，这也是理论“真实性”的存在。

与同一个复杂的经验数据相符合的，也许会有好几个理论，而这些理论或许会在相当大的程度上有所不同。但就理论中的测试及能够加以检验的推论而言，都很难找到这几个理论中不一致的推论。例如，在生物学领域中有一



A



B



C



D

个令人普遍感兴趣的事例，即达尔文学说中物种发展是通过选择生存竞争的理论，和假设物种是基于后天通过自己努力，所得到的特性可遗传的发展理论。

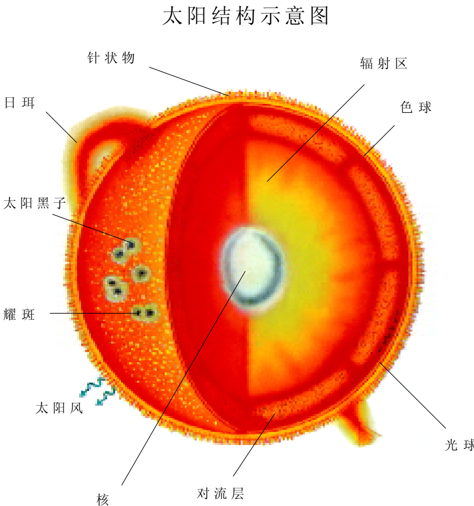
我们还有牛顿力学和广义相对论这一例子可以说明两种理论的推论是基本上一致的。在广义相对论未创立之前，物理学中导出的能够加以检验的推论到现在为止我们所能找到的仍寥寥无几，尽管牛顿力学和广义相对论间有深刻的差异存在于基本假定中。下面，我们再次考虑这些重要的推论，还要讨论迄今完全根据经验迹象得出的推论。

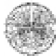


椭圆星系

椭圆星系是星系团中心的主要星系，它可能呈扁平状，也可能是球状。

太阳结构示意图



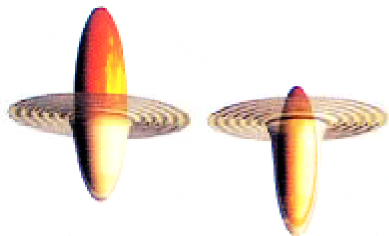


（1）水星近日点[1] 的运动

按照牛顿力学和牛顿的引力定律，行星围绕太阳旋转，绕环形轨道描绘一个椭圆，或者更恰当地说，太阳和行星共有一个重心。在这样的体系中，太阳，或者共同重心，位于椭圆轨道的一个焦点上，在两个行星年期间，太阳与行星间的距离由极小值发展为极大值，随后又再一次向极小值减少。如果代替牛顿定律，而引进稍有不同的引力定律应用于计算之中，我们就会发现，根据新的定律，太阳和行星之间的距离在行星运动的过程中，仍表现出周期性的变化。但是既然这样，太阳和行星的连线所在的一个周期中（从近日点——最接近太阳的点——到近日点）所经过的角仍不是360°。因而轨道曲线将不是闭合曲线。最后，经过一定的时间，轨道曲线将填满轨道平面的环形部分，即在太阳和行星之间，以最大距离和最小距离为半径的两个圆之间的环形部分。

按照与牛顿理论有所不同的广义相对论，一个很小的差异存在于牛顿－开普勒定律与行星在其轨道上的运动间，当从一个近日点走到下一

[1] 近日点：一颗行星或彗星距太阳最近的点。当对象为地球而非太阳时则使用“近地点”一词。天体轨道只能有一个近日点，而远日点则可以没有或有一个。



淡蓝的海王星

19 世纪，天文学家们认为，如果太阳系内没有第八大行星及其附加的万有引力，那么将无法解释天王星的运动。1846 年，通过牛顿的万有引力定律，海王星被发现。由于大气中的甲烷吸收了太阳的黄光及红光，海王星的大气层呈淡蓝色。

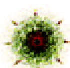
个近日点时，太阳－行星向径[2]所扫过的角度比对应于完全周转一周的角度要大，这个差值由

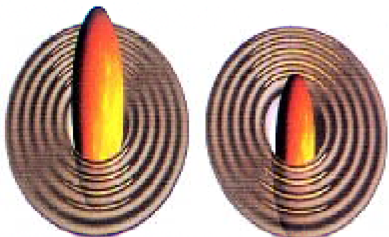
$$+\frac{24\pi^3 a^3}{T^2c^2(1-e)}$$

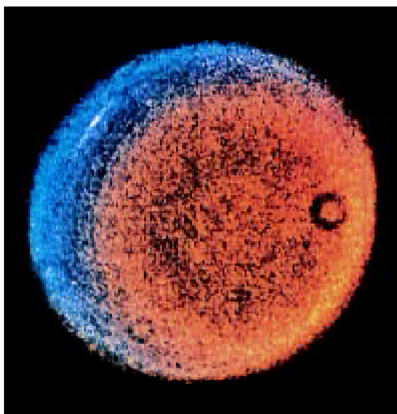
决定。

在这个表达式中，a 表示椭圆的半长轴[3]，e 是椭圆的偏心率[4]，c 是光速，T 是行星公转[5]的周期。我们的结果可以按照广义相对论作如下表达：椭圆的长轴绕太阳旋转，其旋转方向与行星轨道运动方向相一致。理论要求水星的这一转动应达到每一世纪 43″，然而这一转动的量值对我们太阳系的其他行星而言，应该是很小和必然观测不到的。

实际上，天文学家已经发现，牛顿理论对观测水星运动所达到的精确度，远非目前能达到的观测灵敏度所能满足。在考虑到另外的行星对水星的全部影响以后，







天王星和冥王星

天王星的旋转轴非常倾斜，其两极靠近环绕太阳的轨道，这是由于一颗质量很大的小行星经过天王星时，所造成天王星“向侧面倾斜”的原因，而这种倾斜亦导致天王星出现极端奇特的季节：夏季出现 42 个地球年的白昼，冬季则是 42 个地球年的漫漫寒夜。

---

[2] 向径：又称径矢，是空间中点在坐标系中的矢量表示，即原点到某一点的矢量。在质点运动学，它是描述质点运动的基本参量。选定以参考系，质点的位置由原点到质点的径矢 r 表示，径矢随时间的变化 $r(t)$ 则完全描述了质点的运动。

径矢的改变称为位移：$\Delta r = r_2 - r_1$

径矢的导数称为速度：$\dot{r} = \frac{dr}{dt}$　　径矢的二阶导数称为加速度：$\ddot{r} = \frac{d^2r}{dt^2}$

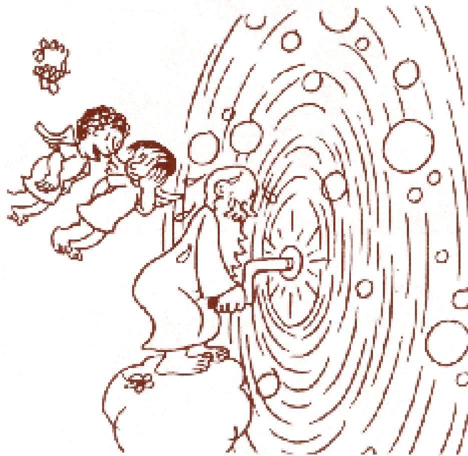
不同坐标系中的径矢

直角坐标系：$r = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$　　柱坐标系：$r = \rho\hat{i} + z\hat{j}$　　球坐标系：$r = r\hat{r}$

发现（勒韦耶，1859 年；纽康姆，1895 年）让水星轨道近日点的移动仍然无法解释，这种移动的量值与我们提及的每世纪 43″ 并无很明显的差别，此项完全根据经验的结果的不确定性范围总计只达到几秒。

（2）光线在引力场中的偏转

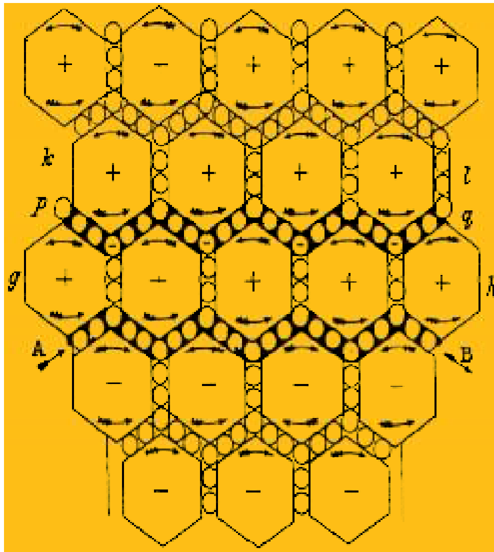
在第二章第五节中，按照广义相对论，一道沿直线传播的光线在穿过引力场时其路程发生弯曲，光的这种弯曲情况与以抛物线抛出——通过引力场的物体其路程发生弯曲相似。作为一个理论结果，我们应该期望有一道光线从一个天体旁经过时将发生面向该天体的偏离。对于距离太阳半径中心处的一道光线而言，偏转角



搅动宇宙　漫画　19 世纪

每一条主宰宇宙的自然法则，都刻画了人类历史发展演进的轨迹。宇宙恰好具有一种特质，可以创造出具有意识、思维与智力的生物。针对这些说法，有以下可能的解释：宇宙中的一切事物，要不是偶然间发生，就是受某种创造力的支配。





半人马座 A 射电星系

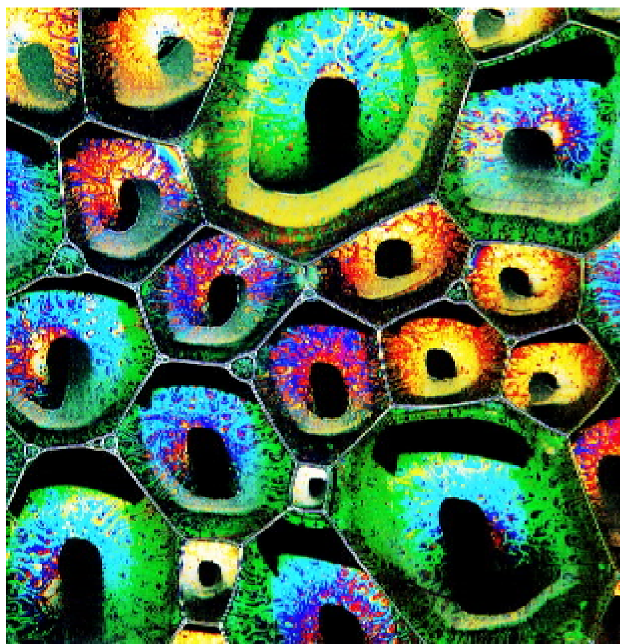
半人马座是南天最耀眼的星座之一。这个壮丽的星系，具有由明亮蓝色星团所构成的紧密旋臂，距离我们约 1.5 亿光年。这张影像是由欧洲南方天文台的极大口径望远镜所拍摄，在影像的背景，可以隐约看到许多较远和暗淡的星系。

---

［3］半长轴：半长轴是椭圆（行星公转轨道）长轴的一半长，长轴是过焦点与椭圆相交的线段长。半长轴长即是行星离主星的平均距离。近星点和远星点可由半长轴长与离心率计算得出，近日点 $=a(1-e)$，　远日点 $=a(1+e)$。

［4］偏心率：常用于力学方面。在二次曲线的标准形式中，偏心率为 $\varepsilon=\sqrt{1+\frac{2pE}{K}}$ 。其中，E 是相对运动的总机械能，k 是有心力的势函数的比例常数。当 $\varepsilon=0$ 时，即 $E=-\frac{K}{2p}$ ，其轨道是圆；当 $\varepsilon<1$ 时，即 $-\frac{K}{2p}<E<0$ ，其轨道是椭圆；当 $\varepsilon=1$ 时，即 $E=0$ 时，轨道是抛物线；当 $\varepsilon>1$ 时，即 $E>0$ 时，轨道是双曲线（对称反映）。

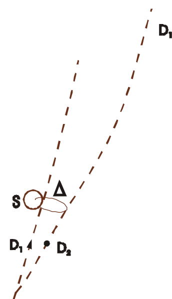
［5］公转：公转是一件物体以另一件物体为中心所做的循环运动，一般用来形容行星环绕恒星或者卫星环绕行星的活动。所沿着的轨道可以为圆、椭圆、双曲线或抛物线。



（α）应有如下关系：

$$\alpha = \frac{1.7''}{\Delta}$$

可以对这个理论再补充一句，该偏转的一半是由于太阳的牛顿引力场造成，另一半由太阳导致的空间几何形变（“变曲”）造成。



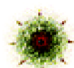
肥皂泡

水的薄膜两边反射来的光使得肥皂泡的颜色非常绚烂，这是因为光的干涉原理在肥皂泡上的反映。



密立根　摄影

密立根（1868~1953年），美国物理学家。他最著名的实验成就是用在电场和重力场中的运动的带电油滴精确地测定了基本电荷，获1922年诺贝尔物理学奖。



这一实验的结果也可以通过在日全食期间对恒星进行照相实验来进行检验。我们之所以选择必须在日全食期间的原因在于：只有在日全食时，才不会因在阳光的强烈照射下而看不见位于太阳圆盘附近的恒星。这一预言的结果可以从右上图中清楚地看到。如果太阳（S）没有出现，一颗实际上被视为无限远的恒星，在地球上观测，它位于方向D_1。但是由于这颗恒星的光在经过太阳时因引力场的作用而发生偏转，在地球上观测，它的位置将在D_2被看到，也就是这颗恒星的视位置比它的真位置离太阳的中心更为遥远。

在实践中，对这个问题的检验按以下方法进行：在日全食时对太阳附近的恒星拍照。此外，当太阳位于天空的其他位置时，也就是在日全食发生前或发生后的早几个月或晚几个月，对天空中的恒星拍摄另一张照片，将这张照片与标准照片比较，在日全食中的照片上，恒星的位置是沿径向外移（远离太阳中心）的，外移的量值对应于角α。

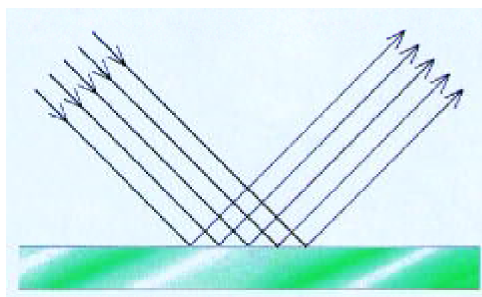
我很感激英国皇家学会和皇家天文学会对这个重要推论进行的研究。

这两个学会没有被第一次世界大战和由战争所引起的物质和精神上的重重困难所吓倒，他们的两个远征观测队整装待发，一个到巴西的索布拉尔，一个到西非的普林西比岛，并派出了几位英国最著名的天文学家（爱丁顿、柯庭汉、克罗姆林、戴维森），拍摄了1919年5月29日的日全食照片。在日全食期间，他们拍摄的恒星照片与其他用作比较的标准照片之间的相对差异只有及其微小的一毫米的百分之几。因此，必须非常精确进行对照片的调准工作，而且对随后不同照片间的比较都需要有很高的准确度。



测量的结果以十分彻底且很满意的方式证实了这个理论。观测和计算所得的恒星位置对于太阳的偏差（以秒计算）的直角分量如下表：

恒星号	第一坐标		第二坐标	
	观测区	计算区	观测区	计算区
11	-0.19	-0.22	+0.16	+0.02
5	+0.29	+0.31	-0.46	-0.43
4	+0.11	+0.10	+0.83	+0.74
3	+0.20	+0.12	+1.00	+0.87
6	+0.10	+0.04	+0.57	+0.40
10	-0.08	+0.09	+0.35	+0.32
2	+0.95	+0.85	-0.27	-0.09



光的波粒二重性

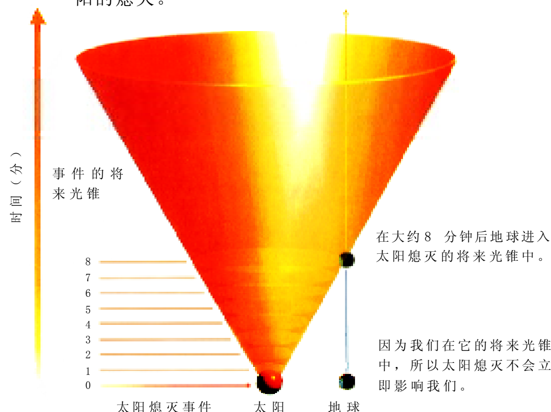
波粒二重性是微观物理在测量过程中表现出的一种特性。根据经典物理学理论，微粒和场是物质的两种基本特性，这两种特性质是互不兼容的，在光的波粒二重性中，光的反射是粒子特征的表现，光的散射和衍射是波动特征的表现。

（3）光谱线的红移

在第二章第六节中已经表明，系统 K_1 相对于伽利略系 K 而转动，其中构造完全一样而且相对于转动的参考物体保持静止的钟的走动频率与它所在的位置有关。现在我们将要对这一相倚关系进行定量研究。钟A被放置于距圆盘中心 r 处，它有一个相对于 K 的速度，这个速度由 $v = wr$ 决定，其中 w 表示圆盘 K_1 相对于 K 的转动角速度。将 v_0 设为表示钟在单位时间内相对于静止的 K 的滴嗒次数（钟的“时率”），那么当这个钟相对于圆盘保持静止，但又以速度 v 相对于 K 运动时，这个钟的“时率”，按照第一章第十二节，将由

时空坐标　合成图片

在时空坐标图中显示，我们要等待多久才能知道太阳的熄灭。



$$\nu = \nu_2 \sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c^2}}$$

决定，或者以充分的精密度由

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu^2}{c^2}\right)$$

决定。这一表达式也可以写成

$$\nu = \nu_0 \left(1 \cdot \frac{1}{c^2} \frac{w^2 r^2}{2}\right)$$

如果我们以 ϕ 表示一个存在于钟的位置和圆盘中心之间的离心力之差，考虑为单位质量从圆盘上钟的位置移动到圆盘中心为克服离心力所需要的值，那么我们有

$$\phi = \frac{w^2 r^2}{2}$$

由此得出下式

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\phi}{c^2}\right)$$

首先，我们从这个表达式看到两个构成完全相同的钟，如果它们走动的频率不同，即说明它们所处的位置与圆盘中心的距离就有差异。在随圆盘转动的观测者看来，这个结果是成立的。

现在，从圆盘上去判断，圆盘处在一个势[6]为 ϕ 的引力场中。因此，这一结果对普遍的引力场也是成立的。此外，我们可以将原子当做发出光谱线的一个钟，这样下述陈述得以

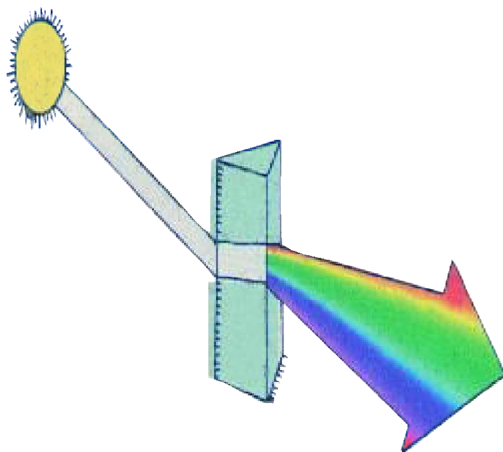
光的散射

光在传播过程中因与物质中分子作用而改变光强的空间分布、偏振状态或频率称为光的散射。蓝天、白云、彩虹等自然现象中都包含着光的散射。



光谱　合成图片

我们得到的颜色是因为每类原子发射某个能量的光子。白光通过棱镜后，可以分解成彩虹一样的光谱，红颜色的作用犹如原始光源中某类原子的一个确认标记。我们可以说，各类原子构成光的来源，无论是电光还是遥远的星光。这是光谱科学的基础。



[6] 势：亦称“位”，描述场的一种量。势一般与物理场相联系，但物理场不一定可用势来描述。势是随空间位置而变化的函数，其数值与势能有关。例如引力场中某点的引力势就是单位质量的质点在该点的势能。势有时也用来描述数学场，这时它与势能无关。

成立：

一个原子吸收或发光的频率[7]依赖于该原子所处的引力场的势。

位于一个天体表面的原子的频率与处于自由空间中的（或位于一个表面狭小的天体上）同一元素的频率稍小。

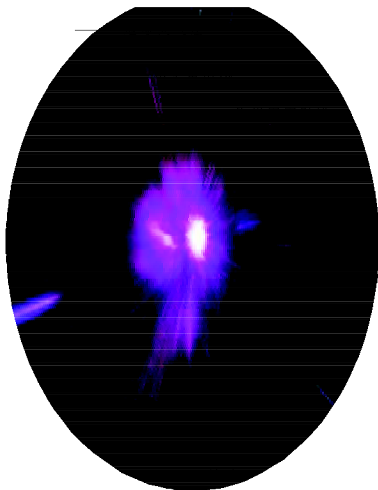
这里，有 $\phi=-K\frac{M}{r}$，其中 K 是牛顿引力常数，M 是天体的质量。因此，在恒星表面的光谱线的传播与在地球表面所产生的光谱线的传播相比较，应发生红向移动，移值是

$$\frac{\nu_0-\nu}{\nu}=\frac{K}{C^2}\cdot\frac{M}{r}$$

相对于太阳来讲，在理论上预计的红向移动值约等于波长[8]的百万分之二。相对于恒星而言，可信赖的结果不可能得出，因为质量 M 和半径 r 还不为人所知。

此种未解决的问题是否还是继续存在，目前（1920 年），天文学家为求得这项工作的解决投入了极大的热情。相对于太阳而言，因此种效应很小而难以对它做出是否存在的判断。格特勃、巴赫姆、艾沃舍德、史瓦西通过对氰光谱带的测量，认为此种效应的存在是确凿无疑的。而其他研究人员，特别是圣·约翰，却自他们的测量结果中，得出了相反意见。

光谱线必定会朝向折射较小的一端进行平均位移，这曾经在对恒星进行的统计



宇宙射线　示意图

宇宙射线是来自太空的粒子，大部分是被称为质子的微小荷电粒子。图为对宇宙射线撞击大气分子时分裂成次级宇宙射线的模拟。



虚时间作为经度它们在北南两极相遇

地球面　合成图片

在一个球面的时空中的虚时间方向可对应于经度，而非纬度。因为所有经线在北南两极相遇，时间在两极停滞不前，虚时间的增加使人们留在同一点，正如在地球北极上向西走的人们仍然留在北极上一样。

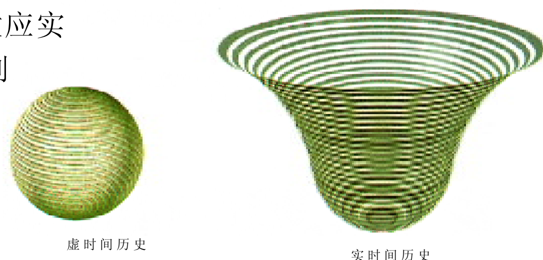


[7] 频率：频率是单位时间内某事件重复发生次数的度量，在物理学中通常以符号罗马字母 f 或希腊字母 ν 表示，其国际单位为赫兹（Hz）。设 t 时间内某事件重复发生 n 次，则此事件发生的频率为 $f=n/t$ 赫兹。又因为周期定义为重复事件发生的最小间隔，故频率也可以周期的倒数表示，即 $f=1/T$，其中 T 表示周期。

在国际标准单位里，频率的单位——赫兹，是以德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹的名字命名。1 赫兹表示事件每一秒发生一次。

[8] 波长：沿着波的传播方向，在波的图形中相对平衡位置的位移时刻相同的两个相邻质点之间的距离。

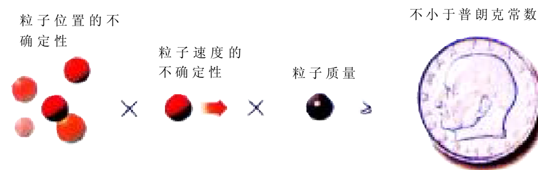
调查中指出过。但是，是否是引力效应实际上导致了这些位移呢？然而，直到目前为止，根据对现有数据的研究，仍不能对这一问题有任何确定的结论。在艾·弗伦德里希的《广义相对论验证》(《自然科学》，1919年第35期第520页，柏林Julius Springer出版。)的论文中，所有的观测结果都被收集在一起，并从我们现在所注意的角度对那些结果进行了详尽讨论。



宇宙的虚时间　合成图片

宇宙在虚时间中的最简单的历史是一个圆球面，正如地球的表面那样，只是多了两个维。这确定在实时间中的历史，它以暴胀的形式膨胀。

然而无论如何，最终的明确结论将在未来几年中得出。如果并不存在由引力势引起光谱线红向移动，则广义相对论就不能成立。另一方面，如果确实是引力势导致了光谱线的位移，那

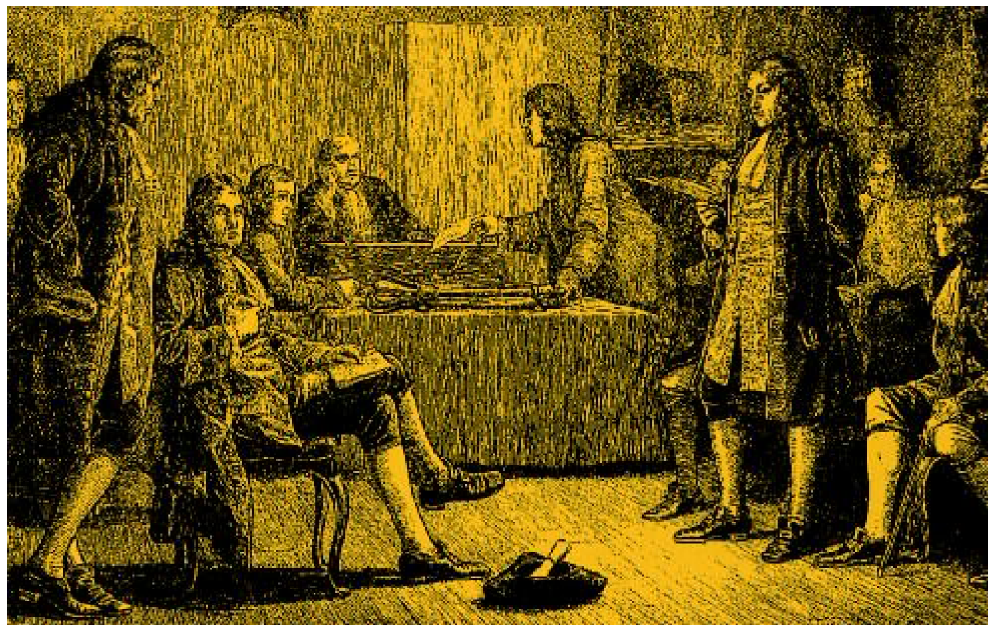


不确定原理方程

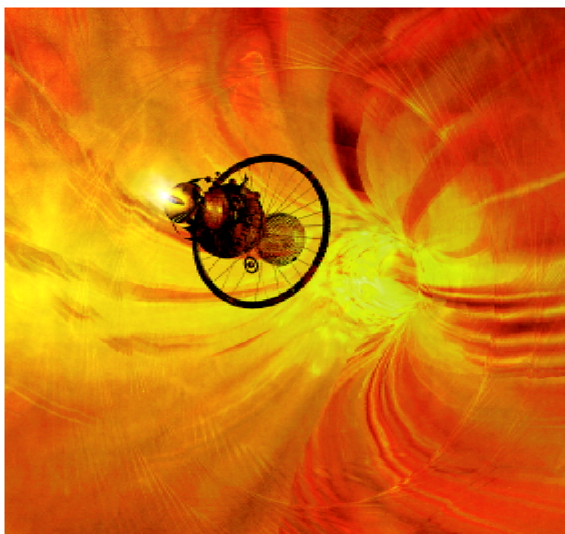
“不确定原理”这条量子力学的基本原理的内容很简单，是指作为观察者，不可能同时准确地测定一个微观粒子的位置和动量，其中一个量愈确定，另一个量的不确定程度就愈大。上图为不确定原理的方程。

英国皇家学会　版画

始建于1660年的英国皇家学会是英国并且是世界上存在时间最长的科学学术团体，学会始终致力于科学发现与探索的最前沿，学科覆盖生物学、数学、物理学、工程学等。图为皇家学会的会员。



么我们关于天体质量的重要情报将由对位移的研究而来。



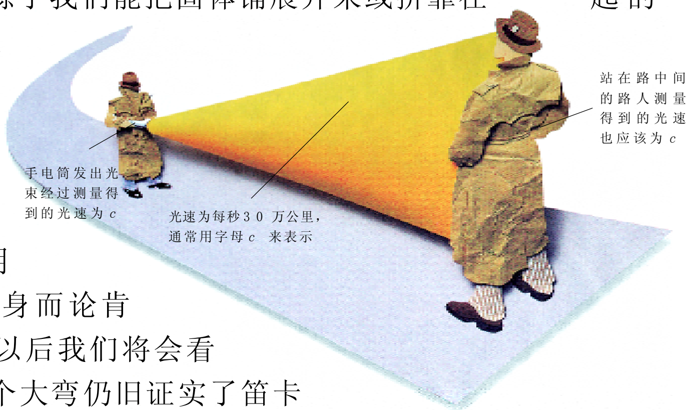
虫洞　合成图片

虫洞就是一个时空细管，它能把两个几乎平坦的相隔遥远的区域连接起来。广义相对论的问世，使人们通过虫洞旅行到未来或过去成为了理论上的可能。

相对论与空间问题

牛顿物理学的特点是，承认空间和时间是与物质一样的有其独立而实际的存在，这是因为牛顿运动定律中出现了加速度的概念。但是，按照这一理论，加速度只可能指“相对于空间的加速度”。所以，为了使牛顿运动定律中出现的加速度有意义，就必须把牛顿的空间看做是“静止的”，或者至少是“非加速的”。其实，牛顿把空间和空间的运动状态说成为具有物理实在性并不妥当，但是，为了使力学具有明确的意义，当时并无其他办法。

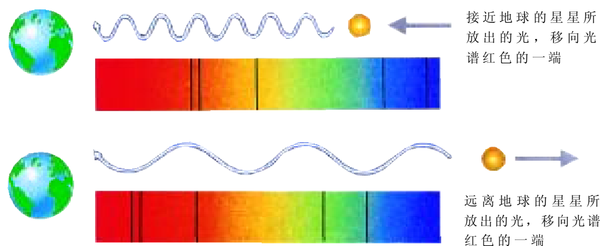
要人们把一般的空间视为具有物理实在性，的确是一种苛求，古往今来的哲学家们均一再拒绝这样的假设。笛卡儿曾经如此论证：空间与广延性是同一的，但广延性是与物体相联系的。因此，没有物体的空间是不存在的，亦即一无所有的空间是不存在的。这个论点的不足是显而易见的。广延性概念起源于我们能把固体铺展开来或拼靠在一起的经验。照这样来推广概念是否合理，可以间接地由其对于理解经验结果时所具有的价值来证明。因此，关于广延性的要领仅能适用于物体的断言，就其本身而论肯定是没有根据的。但是以后我们将会看到，广义相对论绕了一个大弯仍旧证实了笛卡儿的概念。使笛卡儿得出他的十分吸引人的见解的，肯定是这样的感觉，即只要不是万不得已的情况，我们不应该把像空间这一类无法“直接体验”的东西视为具有实在性。



狭义相对论　合成图片

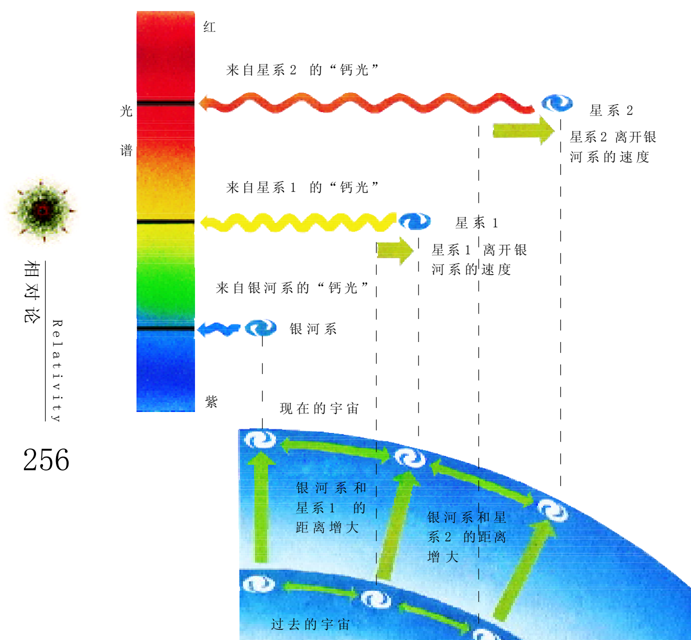
如果两个人静止站立，其中的一个用手电筒发出一束光，那么两个人测量得到的光速都是 c，即每秒30 万公里。





红移现象　示意图

宇宙的膨胀使所有星系彼此分离，星系分隔得越远，分离的速度也就越快，造成光波的间隔变长，使到达地球的光移向光谱中长波或红色的一端，根据宇宙射线的红移现象可以判断，宇宙仍然还在扩张。



引力红移

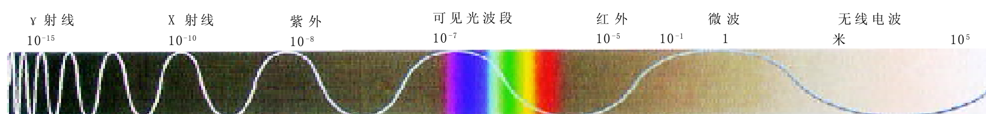
由广义相对论可知，处在引力场中的辐射源发射出来的光，当从远离引力场处观测时，谱线会向长波方向，即光谱红端移动，移动量与源、观测者两处引力势差的大小成正比，光谱线的这种位移被称为引力红移。

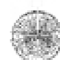
以我们通常的思想习惯为基础来考虑，空间观念或这一观念的必要性的心理起源，远非表面看来那样明显。古代的几何学家所研究的是概念上的东西（点、线、面），并没有像后来解析几何学那样真正研究到空间本身。但是，从某些原始经验中，空间观念仍可以得到一些启示。假定一只造好了的箱子，我们按照某种方法用物体把箱子装满。盛装物体的可能性是"箱子"这个客体的属性，是伴随箱子而产生的，也就是随着被箱子里"被包围着的空间"而产生的。这个"被包围着的空间"因不同的箱子而异，人们很自然地认为这个"被包围着的空间"在任何时刻都不依赖于箱子里面是否有物体存在。当箱子里面没有物体时，那空间看起来似乎是"一无所有"。

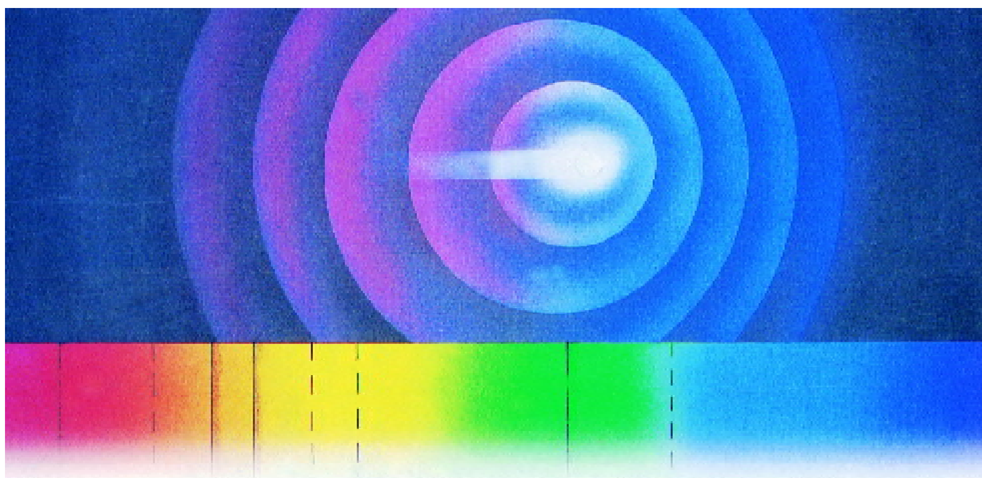
到目前为止，我们的空间概念仅局限于这个箱子。但是，箱子空间的容物可能性，与箱壁的厚薄无关。能否把箱壁的厚度缩减为零，而又使这个"空间"不消失呢？这是一种很自然的求极限的方法。这样，我们的意识中就只剩下了没有箱子的空间，一个本身自然存在原空间。虽然，如果我们忘记了这个起源，这个空间似乎还是很不

穆斯堡尔谱学

通过γ射线的无反冲共振吸收研究固体微观结构的谱学技术被称为穆斯堡尔谱学，是固体物理研究的重要手段之一。







实在。当然，把空间看做是与物质客体无关且可以脱离物质而存在之物，与笛卡儿的论点正好相反（当然这并不防碍他在解析几何学中把空间处理为一个基本概念）。当人们发现水银气压计中存在的真空时，那些支持笛卡儿的见解肯定是不驳而倒。但是，即使在这初始阶段，空间概念或者空间被看做是独立而实在之物，已有某些不能令人满意之处了。

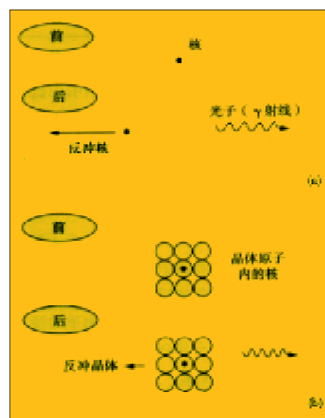
三维欧几里得几何学的课题，是用什么方法把物体装空间（例如箱子）。它的公理体系很容易使人迷惑，使人忘记它所讨论的问题仍然可以成为现实。

如果上述方式可以形成空间概念，按照“填满”箱子的经验推演下去，那么这个空间根本就是有界的。但是，这种担心看起来并无必要，因为我们总可以用一个较大的箱子把那个较小的箱子装进去。因此，空间又好像是无界的。

在这里，我想讨论一下空间概念在物理学思想发展过程中所起的作用。

多普勒效应

根据多普勒效应，可以得出宇宙膨胀的结论。若远处银河系的光线频率在变高，即移向光谱的红端，就是红色多普勒频移。图为光波从银河系中发出的情景。



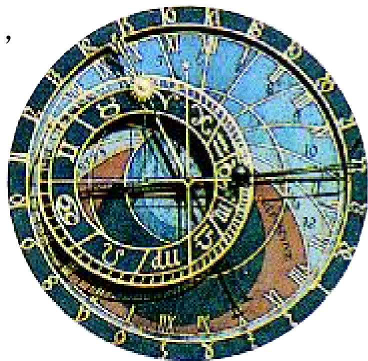
穆斯堡尔效应

穆斯堡尔效应，即原子核辐射的无反冲共振吸收，是德国物理学家穆斯堡尔于1958年首次发现。穆斯堡尔效应在各种精密频差测量中得到广泛应用，如：测量引力红移，验证迈克尔逊—莫雷实验等。

当小箱子 s 在大箱子 S 的全空空间中处于相对静止的状态时，s 的全空空间就是 S 的全空空间的一部分，而且把 s 和 S 的全空空间一起包括进去的那个“空间”，既属于箱子 s，也属于箱子 S。但是，当 s 相对于 S 运动时，这个概念就有点复杂了。人们会认为 s 总是包围着同一空间，但

其所包围的S 的一部分空间则是可变的。于是，我们可以认定每一个箱子各有其特别的、无界的空间，并且有必要假定这两个空间彼此做相对运动。

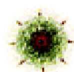
在此之前，空间看来好像是一种无界的媒质或容器，物体在其中游来游去。但是现在我们知道，空间有无限多个，它们彼此作相对运动。“空间是客观存在的，是不依赖于物质的”，这种思想产生于现代科学兴起以前。但是，关于存在着无限多个做相对运动的空间的观念，则是现代科学兴起以后的思想。后一观念在逻辑上无可避免，它甚至在现代科学思想中也远未起过重要作用。



布拉格天文钟

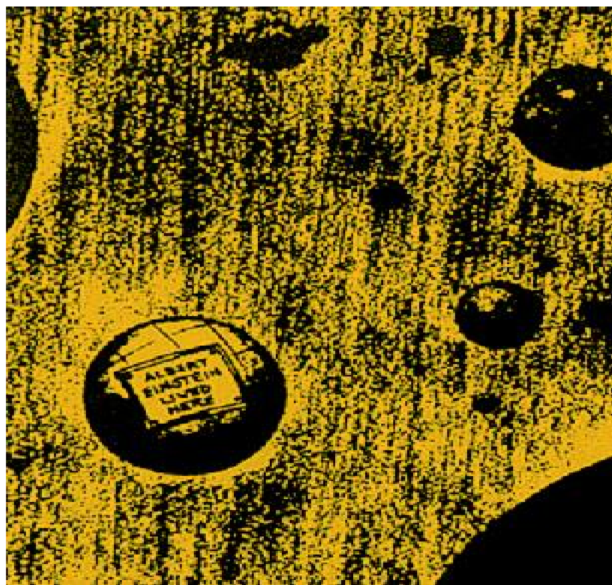
图中的天文钟存放于捷克布拉格，钟面的中心是一个太阳，象征着太阳正是时间的中心。 天文钟除了报时，也呈报时节和星辰。因此，除了可以看到时针、分针的运转外，还可以看到时节和星辰的变动。

关于时间概念，它是与“回想”相联系的，同时也与感觉经验和对这些经验的回忆这两者之间的辨别相联系。感觉经验与回忆之间的辨别，是否在心理上由我们直接感觉到的呢？这是有疑问的。每一个人都曾经有过这样的经历：怀疑某件事是通过自己的感官真正经验过的呢，还是只不过是一个梦。在这两种可能性之间进行辨别，大概最初是脑子要整理出次序来的一种活动。



土星旅行者

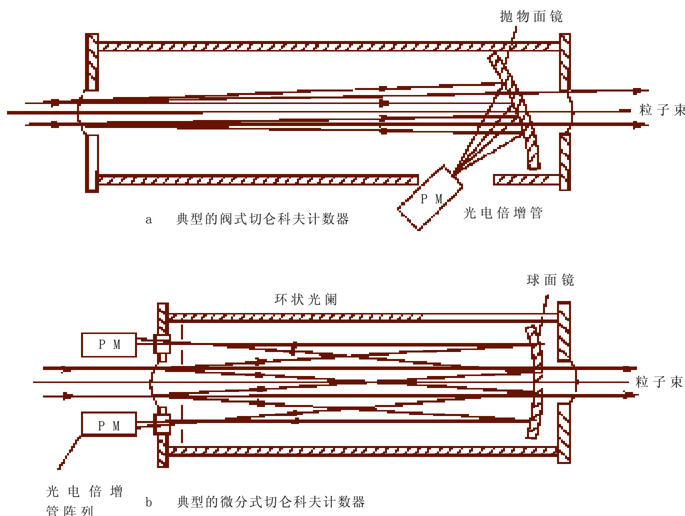
太空人会在太空漂浮，太空船能飞出地球，在太空里快速飞行，这都是牛顿定律带来的结果。由于地球引力的作用，太空人能保持在轨道上；由于土星的引力作用，飞船在通过土星后，能前往更遥远的行星。



如果一个经验是源于一个“回忆”，那么我们可以认为，这个经验与“此刻的经验”相比是“较早的”。这种用于回忆经验的排列次序的原则，其贯彻的可能性就产生了主观的时间概念，亦即关于个人经验的排列的时间概念。

什么是“使时间概念具有客观意义”？比如，某甲（“我”）有这样的经验，“天空在闪电”。与此同时，某甲还经验到某乙的这样的一种行为，某甲可以把这种行为与他本身

关于“天空在闪电”的经验联系起来。这样，某甲认为其他的人也参与了“天空在闪电”的经验。“天空在闪电”不再被解释为一种个人独有的经验，而是解释为他人的经验（或者最终解释为一种“潜在的经验”）。于是就产生了这样的解释：“天空在闪电”本来是进入意识中的一个“经验”，而现在可以解释为一个（客观的）“事件”。当我们谈论“实在的外部世界”时，所指的就是所有事件的总和。



切伦科夫计数器原理

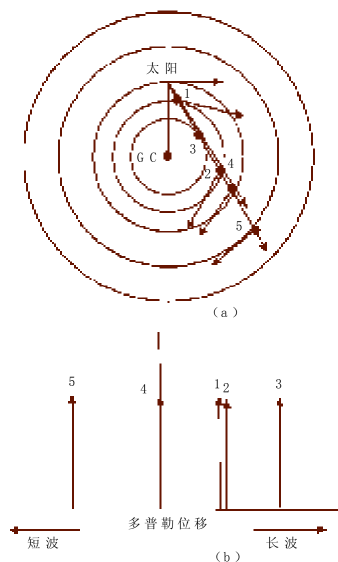
切伦科夫计数器是一种能记录微弱的切伦科夫辐射，又能分辨辐射的传播方向，用以确定带电粒子速度的探测装置，它是实验物理中一种应用广泛的粒子探测器。图为切伦科夫计数器原理示意图。



我们必须为经验规定一种时间排列。如果β迟于α，γ又迟于β，则γ也迟于α（“经验的序列”）。对于已经与经验联系起来的“事件”，乍看起来，似乎可以假定事件的时间排列是存在的，这种排列与经验的时间排列是一致的。人们不自觉地做出了这个假定，直到产生疑问为止。为了获得客观世界的概念，还需要有另一个辅助概念：事件不仅确定于时间，也确定于空间。

多普勒位移量值

图为从上向下看到的5 格测试质点的位置。对于每个质点，箭头的位置表示多普勒位移的量值。



在此之前，我们曾试图描述空间、时间和事件诸概念，并让它们在心理上与经验联系起来。从逻辑上说，这些概念是人类智力的创造物，是思考的工具，它们能把各个经验联系起来，以便更好地考察。要认识这些概念的经验起源，就应该明白我们在多大范围内受这些概念的约束。这样，我们所具有的自由就可以认清了，但是要在必要的时间合理地利用这种自由却相当困难。

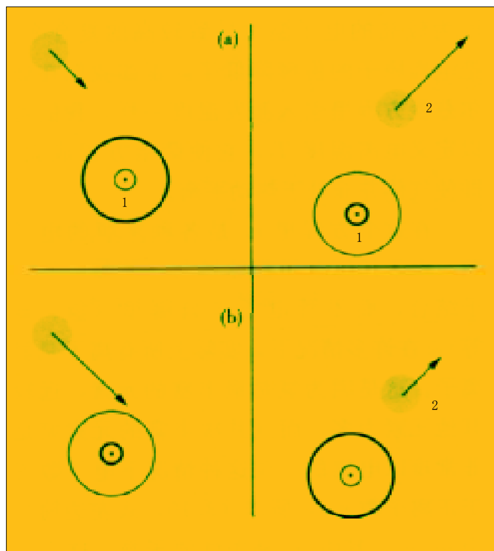
这里，我们还要对空间、时间、事件诸概念作一些必要的补充。我们曾经利用箱子以及箱子里排列物质客体的事例来联系空间概

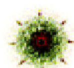
念与经验。所以，此种概念的形成就已经以物质客体（例如“箱子”）的概念为前提。同样，人在客观的时间概念的形成方面，也起着物质客体的作用。所以，物质客体概念的形成比时空概念更早。

这些概念，与心理学方面的痛苦、目的等一类的概念一样，都成形于现代科学兴起以前。目前，物理思想与整个自然科学思想相同，它们的特点是在原则上力求完全用“类空”概念来说明问题，并借此表述一切具有定律形式的关系。物理学家把颜色和音调归为振动，生理学家设法把思想和痛苦归为神经作用。这样，心理因素就从事件存在的因果关系中消除，从而不管在何种情况下都不构成因果关系中的一个独立环节。如今，“唯物主义”一词就是指的这种观点，它认为完全可以用“类空”概念来理解一切关系。

原子运动　示意图

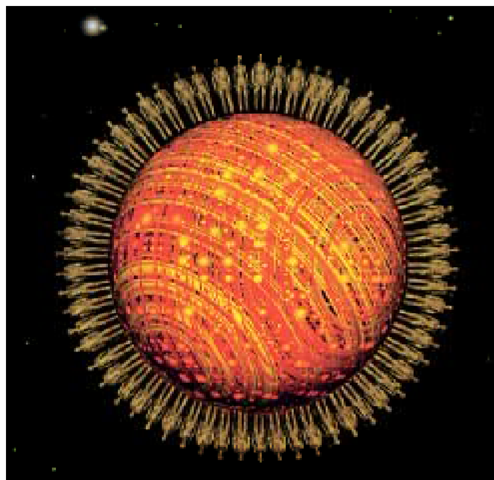
图中左格表示碰撞前的原子，右格表示碰撞后的原子。图（a）表示原子跌落到较低能态，促使原子2运动加快。图（b）表示原子上升到较高的能态。在碰撞后原子1处于较高能态，促使原子2运动减速。





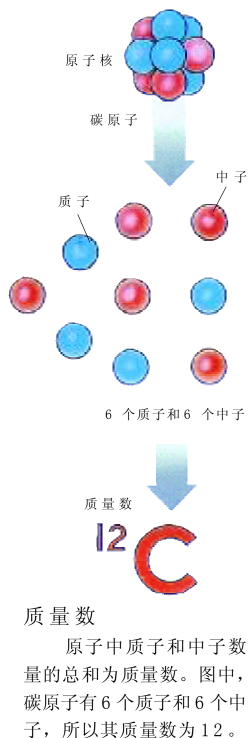
人口剧烈膨胀的地球　合成图片

地球上的人口在日益膨胀，科学家预言地球人口在2600年将会达到擦肩摩踵的程度，到那时，地球会因大量使用电力而发散出红热的光芒。



为什么必须把自然科学思想中的基本观念从柏拉图的奥林巴斯天界（希腊神话传说中，希腊北部的奥林匹斯山是太古时代希腊诸神居住之处，这里指很大的架势而言。）拖下来，并揭发它们的世俗血统呢？答曰：为了使这些观念摆脱与世隔绝的禁令，并能够在构成观念或概念方面获得更多自由。这种想法由休谟和马赫首先提出，他们在这方面功不可没。

科学发展前的空间、时间和物质客体等概念，被科学加以修正，使之更加确切。欧几里得几何学的发展就是这方面的第一个重要成就。我们在看到欧几里得几何学的公理体系的时候，应该看到



质量数

原子中质子和中子数量的总和为质量数。图中，碳原子有6个质子和6个中子，所以其质量数为12。

它的经验起源（把固体展开或拼凑在一起的可能性）。比如说，三维空间和欧几里得特性都源于经验。

刚性的物体是不存在的，这使得空间概念更加微妙。一切物体都能够做弹性形变，它们的体积随着温度的变化而改变。所以，几何结构的表示必须依赖物理概念。但是由于物理学中一些概念的建立还须借助几何学，因而几何学的经验性内容只能就整个物理学的体制来陈述和检验。

原子论及其对物质的有限的可分割性的概念，是空间概念不能忘却的，因为比原子还小的空间无法量度。原子论还迫使我们在原则上放弃这种观念，即认为可以清楚地和静止地划定固体界面。严格说来，即使在宏观领域中，对于相互接触的固体的可能位形而言，精确的定律也不可能存在。

但是，没有人想放弃空间概念。因为在自然科学的最圆满的整个体系中，空间概念看来是不可或缺的。19世纪，马赫曾经认真地考虑过舍弃空间概念，而代之以所有质点之间的瞬时距离的总和的概念（他是为了试图求得对惯性的满意理解）。

（1）场

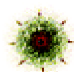
在牛顿经典力学中，空间和时间起着双重作用。第一，空间和时间成了所发生的物理事件的载体或框架，事件是由其空间坐标

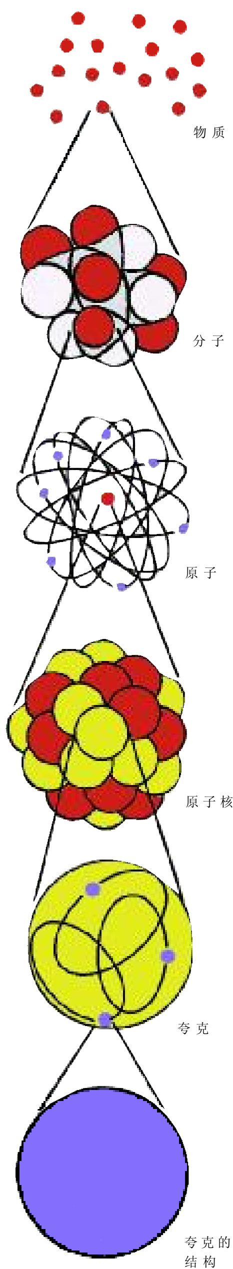


日全食　天文摄影

发生日全食时，天空一片漆黑，人们可以看到天空中距离太阳很近的星体，实际上这些星体要遥远得多。







和时间来描述的。原则上，物质被当成是由“质点”所组成，质点的运动构成物理事件。如果我们把物质看做是连续的，在人们不愿意或不能够描述物质的分立结构的情况下，我们只能暂时作这样的假定：物质的微小部分同样可以当做质点来处理，至少我们可以在只考虑运动，而不考虑此刻不可能或者没有必要归之于运动的那些事件（例如温度变化、化学过程）的范围内照这样来处理。第二，空间和时间可以被当作一种“惯性系”。在可以设想的所有参考系中，惯性系的好处是，惯性定律对于惯性系是有效的。

人们设想，在原则上，不依赖于主观认识的“物理实在”是由空时以及与空时作相对运动的永远存在的质点构成。这个关于空时独立存在的观点，可以这样表达，如果物质消失了，空时本身（作为表演物理事件的一种舞台）将依然存在。

这种观点被理论的发展打破了。最初似乎与空时问题毫不相干的这个发展，再现了场的概念，以及最后要用它来取代粒子（质点）观念的趋势。在经典的体制中，由于物质被看做连续体，场只是作为一种辅助性的概念来命名的。固体在热传导时，它的状态是由每一点在每一个确定时刻的温度来描述的。在数学方法上，将温度 T 表示为温度场，也就是空间坐标的时间 t 的一个数学表示式（或函数）。热传导定律被表述为一种局部关系（微分方程），热传导的所有特殊情况都包括其中。这里，温度就是场的概念的一个例子。这是一个量（或量的复合），它是坐标和时间的函数。另外，就是对液体运动的描述。在每一个点上，每一时刻都有一个速度，其值即由该速度对于一个坐标系的轴

基本粒子

基本粒子原意为“物质存在的基本单位”。后来，大家倾向于不再用“基本粒子”，而改称为“粒子”。图为人们对物质认识的示意图。从上至下：分子→原子→原子核→夸克。



光学望远镜　摄影

光学望远镜拓展了人类的眼界，揭示了许多新天象，先进的光学检测元件和方法使人类对宇宙的探测几乎达到了它的边沿。图为光学望远镜的地面天线，它将微弱的宇宙信号收集起来。



的三个“分量”来加以描述（矢量）。这里，每一个点的速度的各个分量（场分量）也是坐标（x，y，z）和时间（t）的函数。

关于场的特性，它们只存在于有质之中，它们仅仅用来描述这种物质的状态。从场概念的历史发展来看，没有物质的地方就没有场。但是，在19世纪初，人们证明，如果把光看做一种波动场——与弹性固件的机械振动场完全相似，那么光的干涉和运动现象就可以解释了。因此，人们就感到有必要引进一种这样的场：在没有有质物质的情况下也能存在于“一无所有的空间”。

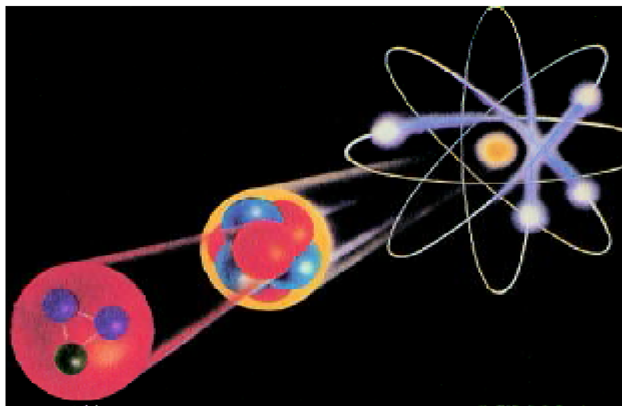


这就导致了一个自相矛盾的状况。因为，按照起源，场概念似乎仅限于描述有质体内部的状态。由于人们确信，每一种场都应看做是一种状态，它们能够给予力学解释，并且是以物质的存在为前提的，因为“场概念只应限于描述有质体内部的状态”的观点就更加确切了。因此人们必须假定，在一向被认为是一无所有的空间中也存在着某种形式的物质，这种物质即是“以太”。

从场必须有一个机械载体与之相联系的假定中，把场概念解放出来，这是物理思想发展史上在心理方面最令人感到兴趣的事件之一。19世纪下半叶，法拉第和麦克斯韦的研究成果越来越清楚地告诉我们，用场描述电磁过程大大胜过了以质点的力学概念为基础的处理方法。由于在电动力学中引进场的概念，麦克斯韦成功地预言了电磁波的存在；由于电磁波与光波在传播时速度相等，我们则不可怀疑它们在本质上的同一性了。因此在原则上，光学成为电动力学的一部分，这个巨大成就产生了一个心理效应：与经典物理学的机械唯物论体制相对立的场概念取得了

空间飞船　合成图片

爱因斯坦的广义相对论是所有现代有关时间旅行讨论的基础。爱因斯坦方程描述宇宙中的物质和能量如何将空间和时间弯曲和变形，从而使空间和时间变成动力量。广义相对论的时空弯曲，使乘坐空间飞船出发前即已返回成为可能性。



星际飞船　合成图片

影片《星际航行》对未来的想象，也就是我们达到先进的但是本质上静态的水平，且就我们对制约宇宙的基本定律的知识而言，是可以实现的。《星际航行》中虚拟出的星际飞船，能以翘曲速度旅行，它比光速要快得多。然而，如果时序防卫猜想是正确的话，我们就必须用火箭推进空间飞船来探索星系，但它比光的速度要慢。



更大的独立性。

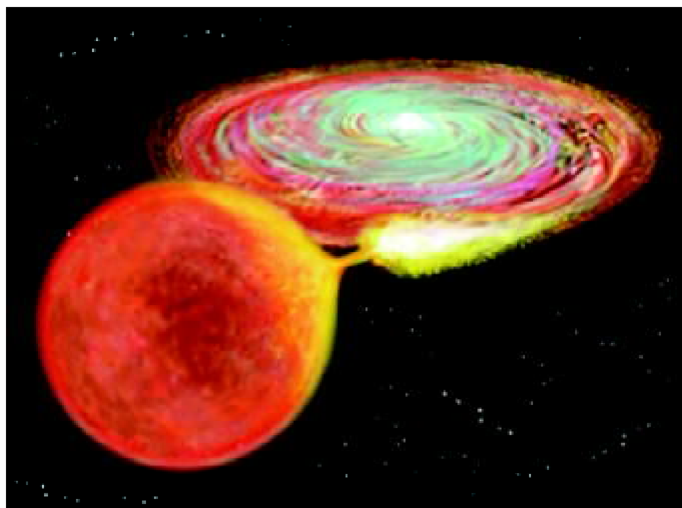
但是最初，人们理所当然地把电磁场解释为以太的状态，并且设法渲染这种状态解释的机械性。这种努力总是失败，于是，科学界逐渐放弃了此种机械解释。然而，在19世纪和20世纪之交，人们仍然确信电磁场必然是以太的状态。

以太学说带来了一个问题：相对于有质体，怎样用力学观点来看待以太的行为？以太参与物体的运动呢，还是相对地保持静止状态？为了解决这个问题，人们做过许多实验，这里应注意两个重要事实：由于地球周年运动而产生的恒星的“光行差”和“多普勒效应”（即恒星相对运动对其发射到地球上的光的频率上的影响）。对于所有这些事实和实验结果，除了迈克尔逊—莫雷实验以外，洛伦兹也做出了解释。他的假定是：以太不参与有质体的运动，它各个部分相互之间完全没有相对运动。这样，以太看来似乎就体现一个绝对静止的空间。但是洛伦兹的研究还取得了更多成就，他解释了在有质体内部发生的所有电磁和光学过程。因为他假定，有质物质与电场之间的相互影响，完全是因为物质的组成粒子带有电荷，这些电荷也参与了粒子的运动。洛伦兹论证、迈克尔逊—莫雷实验所得出的结果，与以太处于静止状态的学说并不矛盾。

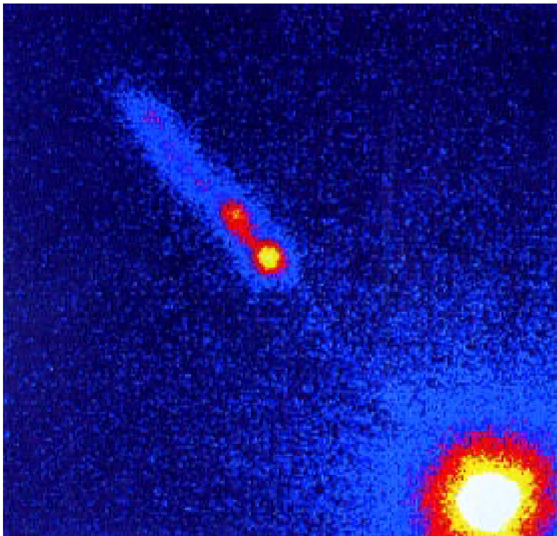
但是，以太学说仍然不能完全令人满

钱德拉塞卡极限

即白矮星的质量上限。钱德拉塞卡研究了白矮星的平衡和稳定性质，利用牛顿引力理论和理想费米气体方程证明了存在一个质量上限，这个上限不大于1.44倍的太阳质量，当星体质量小于这个上限时，存在稳定的平衡解；大于这个上限时，则没有稳定的平衡解。



意，理由是：经典力学告诉人们，一切惯性系或惯性“空间”等效于自然律的表达方式；从一惯性系过渡到另一惯性系，自然律不变。电磁学和光学实验也可以告诉我们同样的事实。但是，电磁理论基础却要求我们，必须选取一个特别的惯性系，这个惯性系就是静止的光以太。这一观点实在非常不能令人满意，难道不会有像经典力学支持惯性系的等效性（狭义相对性原理）那样的修正理论么？



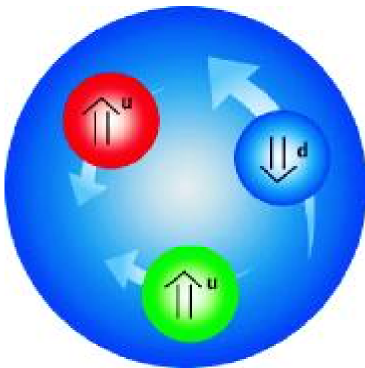
类星体恒星图像

图为类星体3C273，第一个被发现的类恒星图像。

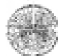
狭义相对论解答了这个问题。狭义相对论采用了麦克斯韦—洛伦兹理论中关于在真空中光速恒定的假定。要使这个假定与惯性系的等效性（狭义相对性原理）相一致，必须放弃“同时性”带有绝对性的观念。此外，对于从一个惯性系过渡到另一个惯性系，必须引用时间和空间坐标的洛伦兹变换。下述公设包括了狭义相对论的全部内容：自然界定律对于洛伦兹变换是不变的。此公设的重要实质在于，它用一种确定的方式限定了所有的自然律。

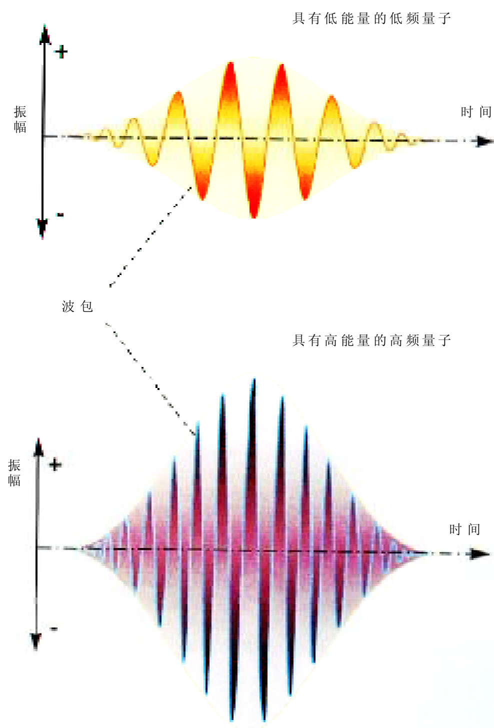
质子中旋转的夸克模拟图

图为质子中夸克旋转的模拟图。在加速器实验中，质子上方的两个旋转夸克会始终和旋转的质子平行，而下方的这个则不会。



狭义相对论如何看待空间问题？首先我们注意，实在世界的四维性并非狭义相对论第一次提出。早在经典物理学中，事件就是由四个数来确定，即三个空间坐标和一个时间坐标。因此，全部物理“事件”都可以认为是寓存于一个四维连续流形之中。但是，经典力学告诉我们，这个四维连续区被客观地分割为一维的时间和三维的空间两部分，而只有三维空间才存在着同时的事件。一切惯性系都可以如此分割。两个真实的事件相对于一个惯性系的同时性，同时含有这两个事件相对于一切惯性系的同时性。我们说经典力学的时间的绝对性即为此意。对此，狭义相对论的看法不同。所有与一个选定的事件同时的诸事件，就一个特定的惯性系而言确实是存在的，但是这不再能说成为与惯性系的选择无





马克斯·普朗克的假设　示意图

德国科学家马克斯·普朗克在1900年提出，光波、X射线和其他的波不能以任意的速率辐射，而必须以某种称为量子的一定的波包发射。并且每个量子具有确定的能量，波的频率越高，其能量越大。

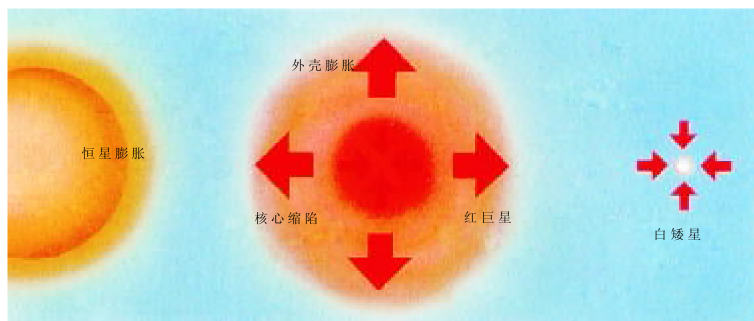
白矮星

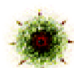
白矮星是一种低光度、高密度、高温度的恒星。因为它的颜色呈白色、体积比较矮小，因此被命名为白矮星。白矮星的前身可能是行星状星云的中心星，它的核能源已经基本耗尽，整个星体开始慢慢冷却、晶化，直至最后“死亡”。根据白矮星的半径和质量，可以算出它的表面重力是地球表面的1　000万~10亿倍。在这样高的压力下，任何物体都已不复存在，电子也脱离了原子轨道变为自由电子。当白矮星质量进一步增大，还会坍缩成密度更高的天体：中子星或黑洞。

关的了。于是，四维连续区再也不能客观地分割为两个部分，整个连续区包含了所有同时事件。所以，“此刻”对于具有空间广延性的世界失去了其客观意义。如果是这样，要表示客观关系的意义而不带有因袭的任意性的话，那么，空间和时间必须看做一个四维连续区，它们在客观上不可分割。

狭义相对论揭示了一切惯性系的物理等效性，证明了关于静止的以太的假设是不成立的，因此必须放弃一种观点——将电磁场看做物质载体的一种状态。这样，在物理描述中，场就成为不能再加分解的基本概念，正如在牛顿的理论中物质概念不能再加分解一样。

现在我们来看，狭义相对论从经典力学吸取了哪些基本观念。在狭义相对论中，自然律要想有效，须引用惯性系作为空时描述的基础。惯性原理和光速恒定原理只有在一个惯性系中才有效。只有在惯性系中，场定律也才能说是有意义和有效的。因此，与在经典力学中一样，狭义相对论中，空间也是表述物理实在的一个独立部分。即使我们把物质和场移走，惯性空间依然存在。这个四维结构（即闵可夫斯基空间）被当做物质和场的载体。各惯性空间连同时间，只是一种





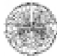
火箭　摄影

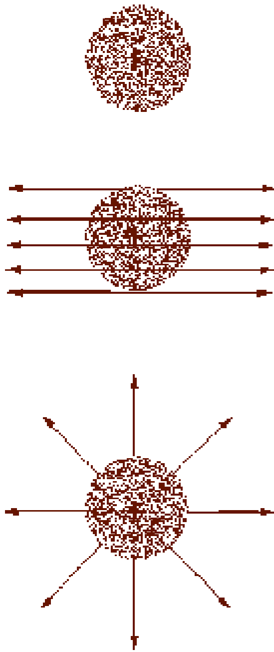
火箭是依靠火箭发动机产生的反作用力推进的飞行器。主要由箭体、推进系统和有效载荷等组成。图为美国卡纳维拉尔角发射场一次航天飞机的成功发射。



特殊的四维坐标系，它们由线性洛伦兹变换联系起来。这个四维结构中并不存在客观地代表“此刻”的部分内容，因此，事物发生和生成的概念并非用不着了，而是更复杂了。因此，将物理实在看做一个四维存在，而不是像以前那样，只看做一个三维存在，似乎更加自然些。

狭义相对论的这个刚性四维空间，与洛伦兹的刚性三维以太有些类似。关于狭义相对论的下列陈述也是合适的：物理状态的描述假设了空间是原先给定的，并且独立存在。因此，连狭义相对论也没有消除笛卡儿的怀疑：“空虚空间”是独立存在的还是先验存在的？这里讨论的真正目的就是要说明，广义相对论在多大的程度上解决了这些疑问。





（2）广义相对论的空间概念

广义相对论的起因是，力图了解惯性质量和引力质量的同等性。比如，在惯性系 S_1 中，它的空间从物理的观点看来是空虚的。在这部分空间中，既没有通常意义上的物质，也没有狭义相对论的意义上的场。设有另一参考系 S_2 相对于 S_1 作匀加速运动。这时，S_2 就不是一个惯性系。对于 S_2 来说，每一个试验物的运动都有一个加速度，它与试验物的物理、化学性质无关。因此，相对于 S_2，就第一级近似而言，存在着一种状态，它与引力场无法区

电子问题中的对称性

如果我们要计算球形分布的电荷产生的电场，所求出的电场一定也具有与电荷分布相同的对称性。

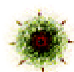
分。所以，S_2也可以相当于一个“惯性系”；不过相对于S_2又另存在一个引力场。因此，如果讨论的体系中包括了引力场，惯性系就失去了它本身的客观意义。如果在它们的基础上建立起一个合理的理论，那么这个理论本身将满足惯性质量与引力质量相等的事实，而这个事实已被经验充分证实。



超伴侣　合成图片

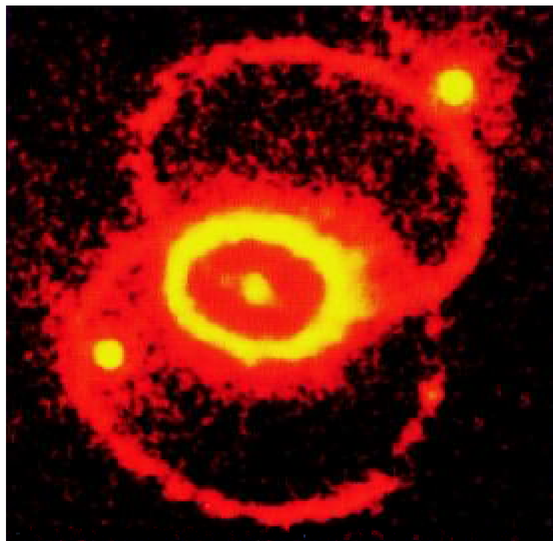
超引力理论认为，每一种费米子和玻色子都具有其自旋比它大或小半个的“超伴侣”，例如光子（它是玻色子）的自旋为1。它的基态能量是正的。光子的超伴侣，光微子的自旋为1/2，使它成为费米子，所以其基态能量是负的。在这种超引力方案中我们得到同等数目的玻色子和费米子。玻色子的基态能量处于天平正的一端，而费米子处于负的一端，基态能量就相互抵消了，因而排除了最大的无穷大。

从四维的观点来看，四个坐标的一种非线性变换与从S_1到S_2的过渡相对应。这里的问题是：哪一种非线性变换是可能的，或者，洛伦兹变换如何推广？下述说法对于回答这个问题具有重要意义。



设先前理论中的惯性系具有如下性质：坐标差由固定不移的“刚性”量杆测量，时间差由静止的钟测量。对第一个假定还须以另一个假定作补充，即对于静止的量杆的相对展开和并接而言，欧几里得几何学中有关“长度”的诸定理是成立的。这样，我们可以从狭义相对论的结果结论如下：对于相对于惯性系（S_1）作加速运动的参考系（S_2）而言，对坐标不再可能作此种直接的物理解释了，现在，坐标也就只能表示空间的维级，一点也不能表示空间的度规性质。于是就有了从已有的变换推广到任意连续变换的可能性。在这里，广义相对性原理的含义是：自然律对于任意连续的坐标变换必须是协变的。这个要求相比狭义相对性原理而言，更有力地限制了一切自然律。

这一系列观念的基础之一是，以场作为一个独立的概念。因为，对于S_2有效的情况

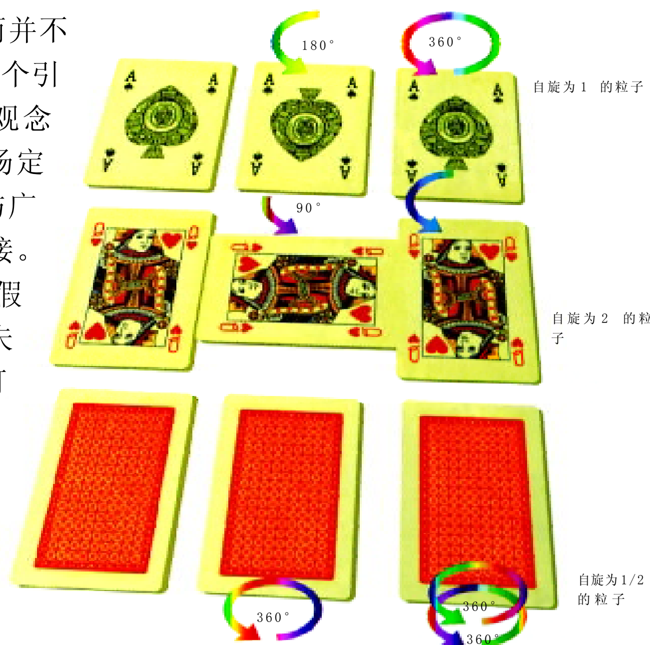

超新星爆发

超新星的质量大约是太阳的50倍，距离地球大约16万光年。超新星爆发是恒星死亡时爆炸形成的，超新星的爆发在星际物质中形成了一个几乎是中空的、巨大的泡状物。



被解释为一种引力场，而并不关心其是否存在着产生这个引力场的质量。借助这些观念还可以明白，与一般的场定律相比，纯引力场定律与广义相对论的联系更为直接。也就是说，我们可以假定，“没有场”的闵可夫斯基空间表示自然律中可能有一种最简单的特殊情况。

这点也可以借助于洛伦兹变换来予以证明。



扑克牌　摄影

所有的粒子都具有自旋的性质，我们可以用扑克牌来展示这一点。首先考虑黑桃A，只有把它转动一整圈或者360°，它才会显得相同，所以我们称它的自旋为1。另一方面，红心Q有两个头，所以只要转动半圈或者180°，就会变成一样。所以我们称它的自旋为2。

现在我们就来考察，从空间概念过渡到广义相对论，要作多大的修改。经典力学和狭义相对论告诉我们，空间的存在不依赖于物质或场。如要描述充满空间并依赖于坐标之物，必须首先设想空时或惯性系连同其度规性质已经存在，否则，对于“充满空间之物”的描述就没有意义。而根据广义相对论，与依赖于坐标的“充满空间之物”相对立的空间，不能脱离此种“充满空间之物”而独立存在。这样，一个纯引力场就可以用从解引力方程而得到的坐标函数来描述。如果我们将引力场亦即诸函数除去，剩下的就只能是绝对的一无所有，而且也不是“拓扑空间”。因为诸函数在描述场的同时，也描述这个流形的拓扑和度规结构性质。由广义相对论的观点判断，上述空间并不是一个没有场的空间，一无所有的空间。一无所有的空间，亦即没有场的空间，是不存在的。空时不能独立存在，只能作为场的结构性质而存在。



射电望远镜　摄影

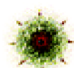
射电望远镜是指用于测量天空中无线电的强质和频率的望远镜。天文学家利用大型的射电望远镜测量恒星发出的各种辐射。图为澳洲帕克斯天文台的射电望远镜。

因此，笛卡儿认为，“一无所有的空间



观测星空　合成图片

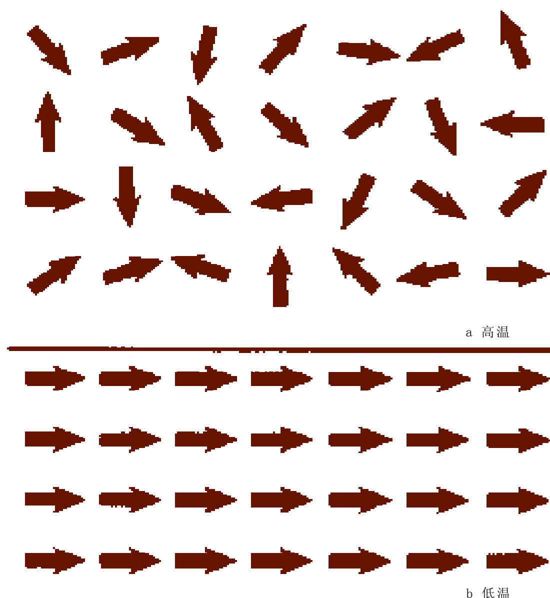
约150亿年前，一场大爆炸后产生了空间与时间。此后，最单纯的物质从最初的微粒出发，织出一幅含千亿银河星系的巨大宇宙毯，其中一个银河的一颗恒星附近，一颗行星出现了人类，懂得欣赏宇宙的美，也懂得追问生命和宇宙的源头。图为人们观测星空时的情景。



并不存在”的见解与真理相去不远。如果仅从有质物体来理解物理实在，那么上述观念看来的确荒谬。“将场看做物理实在的表象”的这种观念，再把广义相对性原理结合起来，才能证明笛卡儿观念的真义：“没有场”的空间是不存在的 。

（3）广义的引力论

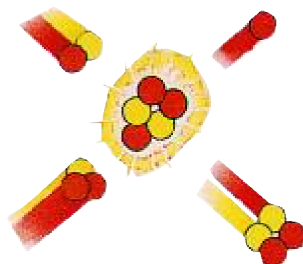
根据以上所述，获得以广义相对论为基础的纯引力场论已经不难。而从这个特殊情况出发，我们可以导出引力定律，并且在此过程中可以避免任意性。对于理论上进一步的发展，广义相对性原理并没有作出明确的决定。在过去几十年中，人们曾经朝着各个不同方向进行探索。他们的共同点是将物理实在看成一个场，而且是作为由引力场推广出来的



磁铁中的自发对称

图a 表示超过临界温度的高温，图b 表示低温。

一个场，因而其场定律是纯引力场定律的一种推广。对于这一推广，我们现在已经找到了最自然的形式，但是还不能确定这个推广的定律能否经得起事实的考验。



在前面的论述中，场定律的个别形式问题还是次要的。现在的问题是，这里所设想的这种场论究竟能否达到其本身的目标。也就是说，这样的场论能否用场来透彻地描述物理实在，包括四维空间在内。对这个问题，当前的物理学家倾向于作否定的回答。根据量子论，他们还认为，一个体系的状态是不能直接规定的，只能对从该体系中所能获得的测量结果给予统计学的陈述而作间接的规定。大家的看法是，只有物理实在的概念削弱之后，才能体现已由实验证实了的自然界的二重性（粒子性和波性）。我认为，我们现有的知识还不能允许作出如此深远的理论否定，不过在相对论性场论的道路上，我们不应半途而废。

核聚变中的原子和中子　示意图

核聚变反应是用氢原子。图为聚变中的原子和中子的运动。

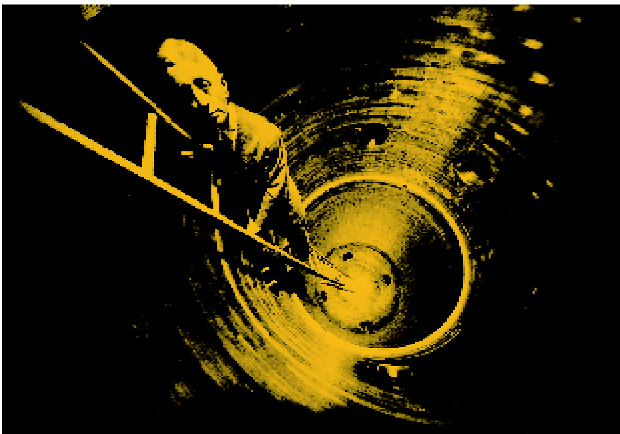
曼哈顿计划基地　摄影

“曼哈顿计划”是1942年11月开始的加工、装配和实验原子弹的计划，基地选在美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯的农场学校中。图为基地的工作和生活场所。



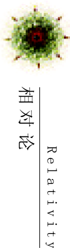
曼哈顿计划　摄影

美国陆军部于1942年6月开始实施这一利用核裂变反应来研制原子弹的计划。该工程历时3年，耗资20亿美元，于1945年7月16日成功进行了世界上第一次核爆炸，并制造出两颗实用的原子弹。图为负责人之一L．R．格罗夫斯准将在一个建设中的核反应壳里。





爱因斯坦年表



年份	事件
1879 年（0 岁）	3 月 14 日上午 11 时 30 分，爱因斯坦出生在德国乌尔姆市班霍夫街 135 号。父母都是犹太人。父名赫尔曼·爱因斯坦，母亲波林·科克。
1880 年（1 岁）	爱因斯坦一家迁居慕尼黑。父同其弟雅各布合办一电器设备小工厂。
1881 年（2 岁）	11 月 18 日，爱因斯坦的妹妹玛雅出世。
1884 年（5 岁）	爱因斯坦对袖珍罗盘着迷。进天主教小学读书。
1885 年（6 岁）	爱因斯坦开始学小提琴。
1886 年（7 岁）	爱因斯坦在慕尼黑公立学校读书。为了遵守宗教指示的法定要求，在家里学习犹太教的教规。
1888 年（9 岁）	爱因斯坦入路易波尔德高级中学学习。在学校继续受宗教教育，直到准备接受受戒仪式。弗里德曼是指导老师。
1889 年（10 岁）	在医科大学生塔尔梅引导下，读通俗科学读物和哲学著作。
1890 年（11 岁）	爱因斯坦的宗教时间，持续约一年。
1891 年（12 岁）	自学欧几里得几何，对此狂热。开始自学高等数学。
1892 年（13 岁）	开始读康德著作。
1894 年（15 岁）	全家迁往意大利米兰。
1895 年（16 岁）	自学完微积分。中学没毕业就到意大利与家人团聚。放弃德国国籍。投考苏黎世瑞士联邦工业大学，未录取。 10 月，转学到瑞士阿劳州立中学。 写了第一篇科学论文。

事件	年份
获阿劳中学毕业证书。 10 月，进苏黎世联邦工业大学师范系学习物理。	1896 年（17 岁）
在苏黎世结识贝索，与其终身友谊从此开始。	1897 年（18 岁）
10 月 19 日，正式申请瑞士公民权。	1899 年（20 岁）
8 月，毕业于苏黎世联邦工业大学。 12 月，完成论文《由毛细管现象得到的推论》，次年发表在莱比锡《物理学杂志》上。	1900 年（21 岁）
3 月 21 日，取得瑞士国籍。 3 月，去米兰找工作，无结果。 5 月，回瑞士，任温特图尔中学技术学校代课教师。 5～7 月，完成电势差的热力学理论的论文。 10 月，到夏夫豪森任家庭教师。三个月后又失业。 12 月，申请去伯尔尼瑞士专利局工作。	1901 年（22 岁）
2 月，到伯尔尼等待工作。和索洛文、哈比希特创建“奥林匹亚科学院”。 6 月，受聘为伯尔尼瑞士专利局的试用三级技术员。 6 月，完成第三篇论文《关于热平衡和热力学第二定律的运动论》，提出热力学的统计理论。 10 月，父病故。	1902 年（23 岁）
1 月，与米列娃结婚。	1903 年（24 岁）
5 月，长子汉斯出生。 9 月，由专利局的试用人员转为正式三级技术员。	1904 年（25 岁）



爱因斯坦年表

1905年（26岁）

3月，写的论文《关于光的产生和转化的一个推测性的观点》，提出光量子假说，并因此而获得1921年的诺贝尔物理学奖。

4月，向苏黎世大学提交论文《分子大小的新测定法》，取得博士学位。

5月，完成论文《论动体的电动力学》，独立而完整地提出狭义相对性原理，开创物理学的新纪元。

9月，写了一篇短文《物体的惯性与能量是否相关》，揭示质能相当关系：$E=mc^2$。

12月，完成论文《热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动》（即“布朗运动”）。

1906年（27岁）

4月，晋升为专利局二级技术员。

11月，完成固体比热的论文，这是关于固体的量子论的第一篇论文。

1907年（28岁）

开始研究引力场理论，在论文《关于相对性原理和由此得出的结论》中提出均匀引力场同均匀加速度的等效原理。

6月，申请兼任伯尔尼大学的编外讲师。

1908年（29岁）

10月，兼任伯尔尼大学编外讲师。

1909年（30岁）

3月和10月，完成两篇论文，每一篇都含有对于黑体辐射论的推测。

7月，接受日内瓦大学名誉博士。

9月，参加萨尔斯堡德国自然科学家协会第81次大会，会见普朗克等，作了《我们关于辐射的本质和结论的观点的发展》报告。

10月，离开伯尔尼专利局，任苏黎世大学理论物理学副教授。

1910年（31岁）

7月，次子爱德华出生。

10月，完成关于临界乳光的论文。

1911 年（32 岁）

2 月，应洛伦兹邀请访问莱顿。

3 月，任布拉格德国大学理论物理学教授。

10 月，去布鲁塞尔出席第一次索尔维会议。

1912 年（33 岁）

2 月，埃伦费斯特来访，两人由此结成莫逆之交。10 月回瑞士，任母校苏黎世联邦工业大学理论物理学教授。

提出光化当量定律。

开始同格罗斯曼合作探索广义相对论。

1913 年（34 岁）

7 月，普朗克和能斯特来访，聘请他为柏林威廉皇家物理研究所所长兼柏林大学教授。

12 月 7 日，在柏林接受院士职务。

发表同格罗斯曼合著的论文《广义相对论纲要和引力理论》，提出引力的度规场理论。

1914 年（35 岁）

4 月 6 日，从苏黎世迁居到柏林。

7 月 2 日，在普鲁士科学院作就职演说。

10 月，反对德国文化界名流为战争辩护的宣言《告文明世界书》，在同它针锋相对的《告欧洲人书》上签名。

11 月，参加组织反战团体“新祖国同盟”。

1915 年（36 岁）

同德哈斯共同发现转动磁性效应。

3 月，写信给罗曼·罗兰，支持他的反战活动。

6～7 月，在阿根廷作了六次关于广义相对论的学术报告。

11 月提出广义相对论引力方程的完整形式，并且成功地解释了水星近日点运动。

1916 年（37 岁）

3 月，完成总结性论文《广义相对论的基础》。

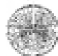
3 月，发表悼念马赫的文章。

5 月，提出宇宙空间有限无界的假说。

8 月，完成《关于辐射的量子理论》，总结量子论的发展，提出受激辐射理论。

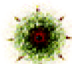
首次进行关于引力波的探讨。

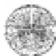
写作《狭义和广义相对论浅说》。



爱因斯坦年表

1917 年（38 岁）	2 月，著述第一篇关于宇宙学的论文，引入宇宙项。接连患肝病、胃溃疡、黄疸病和一般虚弱症，受堂姐艾尔莎照顾。
1918 年（39 岁）	2 月，爱因斯坦发表关于引力波的第二篇论文，包括四级公式。
1919 年（40 岁）	1~3 月，在苏黎世讲学。 2 月，同米列娃离婚。 6 月，与艾尔莎结婚。 9 月，获悉英国天文学家观察日食的结果，11 月 6 日消息公布后，全世界为之轰动。由此，爱因斯坦的理论被视为“人类思想史中最伟大的成就之一”。 12 月，接受德国唯一的名誉学位：罗斯托克大学的医学博士学位。
1920 年（41 岁）	3 月，母亲患癌症去世。 夏访问斯堪的那维亚。 8~9 月，德国出现反相对论的逆流，爱因斯坦遭到恶毒攻击，他起而公开应战。 10 月，接受兼任莱顿大学特邀教授名义，发表《以太和相对论》的演讲。
1921 年（42 岁）	1 月，访问布拉格和维也纳。 1 月 27 日，在普鲁士科学院作《几何学和经验》的报告。 2 月，去阿姆斯特丹参加国际工联会议。 4 月 2 日～5 月 30 日，为了给耶路撒冷的希伯莱大学的创建筹集资金，同魏茨曼一起首次访问美国。在哥伦比亚大学获巴纳德勋章。在白宫受哈丁总统接见。在访问芝加哥、波士顿和普林斯顿期间，就相对论进行了四次讲学。 6 月，访问英国，拜谒了牛顿墓地。





1922 年（43 岁）

1 月，完成关于统一场论的第一篇论文。

3～4 月，访问法国，努力促使法德关系正常化。发表批判马赫哲学的谈话。

5 月，参加国际联盟知识界合作委员会。

7 月，受到被谋杀的威胁，暂离柏林。

10 月 8 日，爱因斯坦和艾尔莎在马赛乘轮船赴日本。沿途访问科伦坡、新加坡、中国香港和上海。

11 月 9 日，在去日本途中，爱因斯坦被授予 1921 年诺贝尔物理学奖。

11 月 17 日~12 月 29 日，访问日本。

1923 年（44 岁）

2 月 2 日，从日本返回途中，到巴勒斯坦访问，逗留 12 天。

2 月 8 日，成为特拉维夫市的第一个名誉公民。

从巴勒斯坦返回德国途中，访问了西班牙。

3 月，爱因斯坦对国联的能力大失所望，向国联提出辞职。

6～7 月，帮助创建“新俄朋友协会”，并成为其执行委员会委员。

7 月，到哥德堡接受 1921 年度诺贝尔奖，并讲演相对论，作为对得到诺贝尔奖的感谢。

发现了康普顿效应，解决了光子概念中长期存在的矛盾。

12 月，第一次推测量子效应可能来自过度约束的广义相对论场方程。

1924 年（45 岁）

6 月，重新考虑加入国联。

12 月，取得最后一个重大发现，从统计涨落的分析中得出一个波和物质缔合的独立的论证。此时，还发现了波色－爱因斯坦凝聚。

1925 年（46 岁）

受聘为德苏合作团体“东方文化技术协会”理事。
5～6 月，去南美洲访问。
与甘地和其他人一道，在拒绝服兵役的声明上签字。
接受科普列奖章。
为希伯莱大学的董事会工作。
发表《非欧几里得几何和物理学》。

1926 年（47 岁）

春，同海森伯讨论关于量子力学的哲学问题。
接受“皇家天文学家”的金质奖章。
接受为苏联科学院院士。

1927 年（48 岁）

2 月，在巴比塞起草的反法西斯宣言上签名。
参加国际反帝大同盟，被选为名誉主席。
10 月，参加第五届布鲁塞尔索尔维物理讨论会，开始同哥本哈根学派就量子力学的解释问题进行激烈论战。
发表《牛顿力学及其对理论物理学发展的影响》。

1928 年（49 岁）

1 月，被选为“德国人权同盟”（前身为德国“新祖国同盟”）理事。
春，由于身体过度劳累，健康欠佳，到瑞士达伏斯疗养，并为疗养青年讲学。发表《物理学的基本概念至其最近的变化》。
4 月，海伦·杜卡斯开始到爱因斯坦家担任终身的私人秘书。

1929 年（50 岁）

2 月，发表《统一场论》。
3 月，50 岁生日，躲到郊外以避免生日庆祝会。第一次访问比利时皇室，与伊丽莎白女皇结下友谊，直到去世之前一直与比利时女皇通信。
6 月 28 日，获普朗克奖章。
9 月以后，同法国数学家阿达马进行关于战争与和平问题的争论，坚持无条件地反对一切战争。

1930 年（51 岁）

不满国际联盟在改善国际关系上的无所作为，提出辞职。5 月，在“国际妇女和平与自由同盟”的世界裁军声明上签字。

7 月同泰戈尔争论真理的客观性问题。

12 月 11 日至次年 3 月 4 日，爱因斯坦第二次到美国访问，主要在加利福尼亚州理工学院讲学。

12 月 13 日，沃克市长向爱因斯坦赠送纽约市的金钥匙。

12 月 19、20 日，访问古巴。

发表《我的世界观》、《宗教和科学》等文章。



1931 年（52 岁）

3 月，从美国回柏林。

5 月，访问英国，在牛津讲学。

11 月，号召各国对日本经济封锁，以制止其对中国的军事侵略。

12 月，再度去加利福尼亚讲学。

为参加 1932 年国际裁军会议，特地发表了一系列文章和演讲。

发表《麦克斯韦对物理实在观念发展的影响》。

1932 年（53 岁）

2 月，对于德国和平主义者奥西茨基被定为叛国罪，在帕莎第纳提出抗议。

3 月，从美国回柏林。

5 月，去剑桥和牛津讲学，后赶到日内瓦列席裁军会议，感到极端失望。

6 月，同墨菲作关于因果性问题的谈话。

7 月，同弗洛伊德通信，讨论战争的心理问题。

号召德国人民起来保卫魏玛共和国，全力反对法西斯。

12 月 10 日，和妻子离开德国去美国。原来打算访问美国，然而，他们从此再也没有踏上德国的领土。

1933 年（54 岁）

1 月 30 日，纳粹上台。

3 月 10 日，在帕莎第纳发表不回德国的声明，次日启程回欧洲。

3 月 20 日，纳粹搜查他的房屋，他发表抗议。后他在德国的财产被没收，著作被焚。

3 月 28 日，从美国到达比利时，避居海边农村。

4 月 21 日，宣布辞去普鲁士科学院职务。

5 月 26 日，给劳厄的信中指出科学家对重大政治问题不应当默不作声。

6 月，到牛津讲学后即回比利时。

7 月，改变绝对和平主义态度，号召各国青年武装起来准备同纳粹德国作殊死斗争。

9 月初，纳粹以两万马克悬赏杀死他。

9 月 9 日，渡海前往英国，永远离开欧洲大陆。

10 月 3 日，在伦敦发表演讲《文明和科学》。

10 月 10 日，离开英国，10 月 17 到达美国，定居于普林斯顿，应聘为高等学术研究院教授。

1934 年（55 岁）

文集《我的世界观》由其继女婿鲁道夫 • 凯泽尔编辑出版。

1935 年（56 岁）

5 月，到百慕大作短期旅行。在百慕大正式申请永远在美国居住。这也是他最后一次离开美国。

获富兰克林奖章。

同波多耳斯基和罗森合作，发表向哥本哈根学派挑战的论文，宣称量子力学对实在的描述是不完备的。

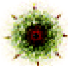
为使诺贝尔奖金（和平奖）赠予关在纳粹集中营中的奥西茨基而奔走。

1936 年（57 岁）

开始同英费尔德和霍夫曼合作研究广义相对论的运动问题。

12 月 20 日，妻艾尔莎病故。

发表《物理学和实在》、《论教育》。



1937年（58岁）

3～9月，参加由英费尔德执笔的通俗册子《物理学的进化》的编写工作。

3月声援中国“七君子”。

6月，同英费尔德和霍夫曼合作完成论文《引力方程和运动问题》，从广义相对论的场方程推导出运动方程。

1938年（59岁）

同柏格曼合写论文《卡鲁查电学理论的推广》。

9月，给5000年后的子孙写信，对资本主义社会现状表示不满。

1939年（60岁）

8月2日，在西拉德推动下，上书罗斯福总统，建议美国抓紧原子能研究，防止德国抢先掌握原子弹。

妹妹玛雅从欧洲来美，在爱因斯坦家长期住下来。

1940年（61岁）

5月15日，发表《关于理论物理学基础的考查》。

5月22日，致电罗斯福，反对美国的中立政策。

10月1日取得美国国籍。

1941年（62岁）

发表《科学和宗教》等文章。

1942年（63岁）

10月，在犹太人援苏集会上热烈赞扬苏联各方面的成就。

1943年（64岁）

5月，作为科学顾问参与美国海军部工作。

1944年（65岁）

为支持反法西斯战争，以600万美元拍卖1905年狭义相对论论文手稿。发表对罗素的认识论的评论。

12月，同斯特恩、玻尔讨论原子武器和战后和平问题，听从玻尔劝告，暂时保持沉默。

1945年（66岁）

3月，同西拉德讨论原子军备的危险性，写信介绍西拉德去见罗斯福，未果。

4月，从高等学术研究院退休（事实上依然继续照常工作）。9月以后连续发表一系列关于原子战争和世界政府的言论。

爱因斯坦年表

1946 年（67 岁）

5 月，发起组织“原子能科学家非常委员会”，担任主席。5 月，接受黑人林肯大学名誉博士学位。写长篇《自述》，回顾一生在科学上探索的道路。

5 月，妹妹玛雅因中风而瘫痪，以后每夜念书给她听。

10 月，给联合国大会写公开信，敦促建立世界政府。

1947 年（68 岁）

继续发表大量关于世界政府的言论。

9 月，发表公开信，建议把联合国改组为世界政府。

1948 年（69 岁）

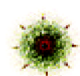
4～6 月，同天文学家夏普林利合作，全力反对美国准备对苏联进行“预防性战争”。

抗议美国进行普遍军事训练。

发表《量子力学和实在》。

前妻米列娃在苏黎世病故。

12 月，作剖腹手术，在腹部主动脉里发现一个大动脉瘤。



1949 年（70 岁）

1 月 13 日，爱因斯坦出院。

1 月，写《对批评的回答》，对哥本哈根学派在文集《阿尔伯特·爱因斯坦：哲学家—科学家》中的批判进行反批判。

5 月，发表《为什么要社会主义》。

11 月，“原子能科学家非常委员会”停止活动。

1950 年（71 岁）

2 月 13 日，发表电视演讲，反对美国制造氢弹。

4 月，发表《关于广义引力论》。

文集《晚年集》出版。

3 月 18 日，在遗嘱上签字盖章。内森博士被指名为唯一的遗嘱执行人。遗产由内森博士和杜卡斯共同托管。信件和手稿的最终贮藏所是希伯莱大学。其他条款当中还有：小提琴赠给孙子伯恩哈德·凯撒。

1951年（72岁）

连续发表文章和信件，指出美国的扩军备战政策是世界和平的严重障碍。

6月，妹妹玛雅在长期瘫痪后去世。

9月，“原子能科学家非常委员会”解散。

1952年（73岁）

发表《相对论和空间问题》、《关于一些基本概论的绪论》。11月以色列第一任总统魏斯曼死后，拒绝以色列政府请他担任第二任总统。



1953年（74岁）

4月3日，给伯尔尼时代的旧友写《奥林匹亚科学院颂词》，缅怀青年时代的生活。

5月16日，给受迫害的教师弗劳恩格拉斯写回信，号召美国知识分子起来坚决抵抗法西斯迫害，引起巨大反响。为纪念玻恩退休，发表关于量子力学解释的论文，由此引起两人之间的激烈争论。

发表《〈空间概念〉序》。

1954年（75岁）

3月，75岁生日，通过“争取公民自由非常委员会”，号召美国人民起来同法西斯势力作斗争。

3月，被美国参议员麦卡锡公开斥责为“美国的敌人”。

5月，发表声明，抗议对奥本海默的政治迫害。

秋，因患溶血性贫血症卧床数日。

11月18日，在《记者》杂志上发表声明，不愿在美国做科学家，而宁愿做一个工匠或小贩。

完成《非对称的相对论性理论》。

1955年（76岁）

2～4月，同罗素通信讨论和平宣言问题，4月11日在宣言上签名。

3月，写《自述片断》，回忆青年时代的学习和科学探索的道路。

3月15日，挚友贝索逝世。

4月3日，同科恩谈论关于科学史等问题。

4月5日，驳斥美国法西斯分子给他扣上“颠覆分子”帽子。

4月13日在草拟一篇电视讲话稿时发生严重腹痛，后诊断为动脉出血。

4月15日，进普林斯顿医院。

4月18日1时25分，在医院逝世。当日16时遗体在特伦顿火化。遵照其遗嘱，骨灰被秘密保存，不发讣告，不举行公开葬仪，不做坟墓，不立纪念碑。

